

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Znalostní systémy pro podporu rozhodování v lékařství
Knowledge-based Systems for Decision Support in
Medicine

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Renata Karchová**
Studijní program: **N2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3901T009 Biomedicínské inženýrství**
Téma: **Znalostní systémy pro podporu rozhodování v lékařství**
Knowledge-based Systems for Decision Support in Medicine

Zásady pro vypracování:

1. Problematika typů terapeutických zákroků.
2. Přístupy rozhodování o typu terapeutického zákroku.
3. Fuzzy-logické expertní systémy pro podporu rozhodování.
4. Upřesnění dedikace expertního systému.
5. Návrh IF-THEN pravidel báze znalostí.
6. Implementace expertního systému a jeho ladění.
7. Simulace, testování a ověření funkce navrženého expertního systému.
8. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] POKORNÝ, Miroslav. *Expertní systémy*. Ostrava: Ostravská univerzita, PFF, 2012.
- [2] NOVÁK, Vilém, Irina PERFILIEVA a Jiří MOČKOŘ. *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*. Boston: Kluwer Academic, c1999, xiii, 320 p. ISBN 0-7923-8595-0.
- [3] NOVÁK, Vilém. *Fuzzy množiny a jejich aplikace*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00325-3.
- [4] NCCN. *NCCN guidelines for treatment of cancer*. [s.l.]: NCCN, 2013. Dostupné z: <http://www.nccn.org>.
- [5] PENAHER, Marek. *Vývoj metody pro systematickou diagnostiku kondice cévního systému s využitím informace pletysmografického záznamu*. Disertační práce. Ostrava, 2000. Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra Měřicí a řídicí techniky (katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství).
- [6] ZHANG, Yanqiong, et al. LiverAtlas: a unique integrated knowledge database for systems-level research of liver and hepatic disease. *LIVER INTERNATIONAL*. SEP 2013, Volume 33, Issue 8, s. 1239-1248. DOI: 10.1111/liv.12173. ISSN 1478-3223.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Miroslav Pokorný**

Konzultant diplomové práce: **MUDr. Petr Vávra, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.“

Renata Karchová

V Ostravě dne 7. 5. 2015

Bc. Renata Karchová

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Miroslavu Pokornému a zároveň Ing. Janě Nowakové a MUDr. Evě Skácelíkové za čas, který mi věnovali během konzultací, za trpělivost a připomínky i rady, kterými přispěli k vypracování této práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vytvořením expertního systému pro podporu rozhodování o velikosti výsledné radioterapeutické dávky u pacientů postižených rakovinou rekta. Systém využívá znalostí experta a při určení radioterapeutické dávky poskytne stejně kvalitní rozhodnutí. Takto navržený systém odráží postup Onkologické kliniky ve Fakultní nemocnici Ostrava při léčbě rakoviny rekta. Systém je navržený v programovém prostředí LFLC 2000 a pro jednodušší přístup je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní v MATLABu. V práci je rovněž popsán expertní systém jako vhodný nástroj umělé inteligence pro podporu rozhodování při řešení problémů, s ním se pojí i fuzzy logika.

Klíčová slova

rakovina rekta, radioterapie, expertní systém, fuzzy logika, LFLC

Abstract

This thesis deals with creating an expert system to support decision-making about of the final radiotherapy dose for rectal cancer patients. It use of the knowledge extract from experts and during the determination of radiotherapy doses provides the same quality of decisions. This system reflects the approach of the Oncology Clinic at the hospital Fakultní nemocnice Ostrava in the treatment of rectal cancer. The system is designed in a programming environment LFLC 2000, and for easier attitude the graphical user interface was created in MATLAB. The work also describes an expert system as an instrument of artificial intelligence for decision support in solving the problems associated with the fuzzy logic.

Key words

rectal cancer, radiotherapy, knowledge-based expert system, fuzzy logic, LFLC

Seznam použitých symbolů a zkratek

COG	Center of Gravity, jednoduchá metoda těžiště
$\mu_F(u)$	Funkce příslušnosti prvku u do fuzzy množiny F
DNF	Fuzzy Aproximace s Minimem
GUI	Graphical User Interface
CHT	Chemoterapie
IMRT	Intensity-Modulated Radiation Therapy
Gy	Jednotka dávky
KI	Karnofského index
TNM	Klasifikace nádorů, T-Tumor, N-Nodes, M- metastasis
LFLC	Linguistic Fuzzy Logic Controller
MR	Magnetická rezonance
CT	Počítačová tomografie
RCHT	Radiochemoterapie
RT	Radioterapie

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Rektum a karcinom rektu	2
3.	Léčba karcinomu rektu	5
3.1.	Léčba dle stádií	5
3.2.	Chirurgická léčba	6
3.3.	Chemoterapie	6
3.3.1.	Neoadjuvantní chemoterapie	6
3.3.2.	Adjuvantní chemoterapie	7
3.3.3.	Paliativní chemoterapie	7
3.3.4.	Chemoradioterapie	7
3.4.	Radioterapie	7
3.4.1.	Neoadjuvantní radioterapie	8
3.4.2.	Adjuvantní radioterapie	8
3.4.3.	Intraoperační radioterapie (IORT)	8
3.4.4.	Kombinace neoadjuvantní a adjuvantní radioterapie	8
4.	Rozhodování o výběru vhodné terapie	9
4.1.	Karnofského index (KI)	9
4.2.	TNM klasifikace	9
4.3.	Místo ozáření a druh radioterapie	10
4.3.1.	Adjuvantní	10
4.3.2.	Neoadjuvantní	10
4.3.3.	Radikální	10
4.4.	Vzdálenost důležitých orgánů od nádoru	11
4.4.1.	Střevní sliznice	11
4.4.2.	Močový systém	11
4.4.3.	Reprodukční orgány	11
5.	Systémy pro podporu rozhodování	12
5.1.	Rozhodování a umělá inteligence	12
5.2.	Expertní systémy	12
5.3.	Teoretické principy použitých metod	14

5.3.1.	Vágnost a fuzzy množiny	14
5.3.2.	Jazykové modely a fuzzy-logika	18
6.	Expertní systém pro rozhodování v radioterapii.....	24
6.1.	Návrh jazykového modelu a implementace expertního systému v prostředí LFLC	24
6.1.1.	Vstupní jazykové proměnné expertního systému	24
6.1.2.	Výstupní jazyková proměnná expertního systému	29
6.1.3.	Pravidla báze znalostí expertního systému	31
6.1.4.	Implementace v programové prostředí LFLC	30
6.1.5.	Interaktivní systém v prostředí MATLAB-Simulink	33
7.	Ověření funkce navrženého systému	37
7.1.	Simulační ověření funkce jazykového modelu	37
7.2.	Experimentální ověření funkce systému	39
8.	Závěr	42
	Seznam použité literatury	43
	Seznam příloh	45

1. Úvod

V současné době celosvětově přibývá pacientů s rakovinou konečníku – rekta. Toto onemocnění je velice komplexní a jeho léčba je poměrně náročná. Vždy je však nutné držet se stanovených postupů a standardů. Každá klinika či pracoviště má svůj lokální protokol léčby, který následuje osvědčené a doporučené postupy při radioterapii.

Protokol obsahuje doporučení léčby, avšak konečné rozhodnutí má v rukou vždy lékař, který určí, jaký postup léčby rakoviny konečníku bude zvolen, nebo jaká dávka v radioterapii bude aplikována.

Tato práce je zaměřena na návrh expertního systému pro podporu rozhodování v radioterapii, který využívá znalostí převzatých od odborníka a při určení radioterapeutické dávky poskytne stejně kvalitní rozhodnutí.

Diplomová práce je členěna do několika kapitol zabývajících se odbornou tematikou, potřebnou k pochopení dané problematiky a následně vytvořením a popisem funkčnosti expertního systému.

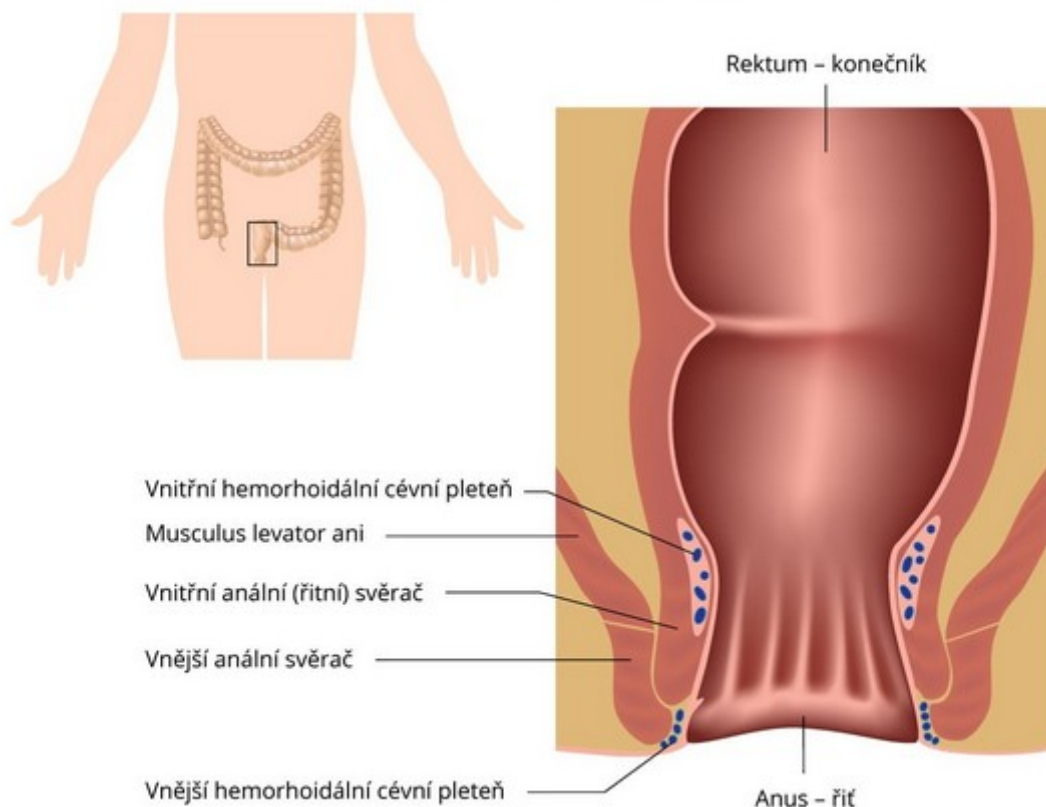
První část se tedy věnuje teoretickému popisu rakoviny recta – ve stručnosti se soustředí na anatomii, uvádí současný přehled možností terapie a popis faktorů, které určují výslednou radioterapeutickou dávku. Do teorie je zahrnut také popis systémů pro podporu rozhodování a teoretické principy použitých metod.

Další část se zabývá návrhem expertního systému navrženého ve vývojovém programovém prostředí LFLC 2000 (Linguistic Fuzzy Logic Controller). Tento jazykový model je tvořen osmi vstupními jazykovými proměnnými a jednou výstupní proměnnou. Model je určen k rozhodování o velikosti výsledné radioterapeutické dávky. V práci je rovněž podrobně popsána možnost propojení báze pravidel vytvořených v LFLC 2000 s MATLABem Simulinkem. Je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje uživateli lepší přehlednost a snadnější přístup k takovému systému.

Součástí diplomové práce je rovněž CD s přílohami a daným navrženým expertním systémem. Přílohy jsou rovněž knihovny vytvořené v MATLABu Simulinku, které jsou nezbytné pro spuštění a správnou funkčnost celého expertního systému.

2. Rektum a karcinom rekta

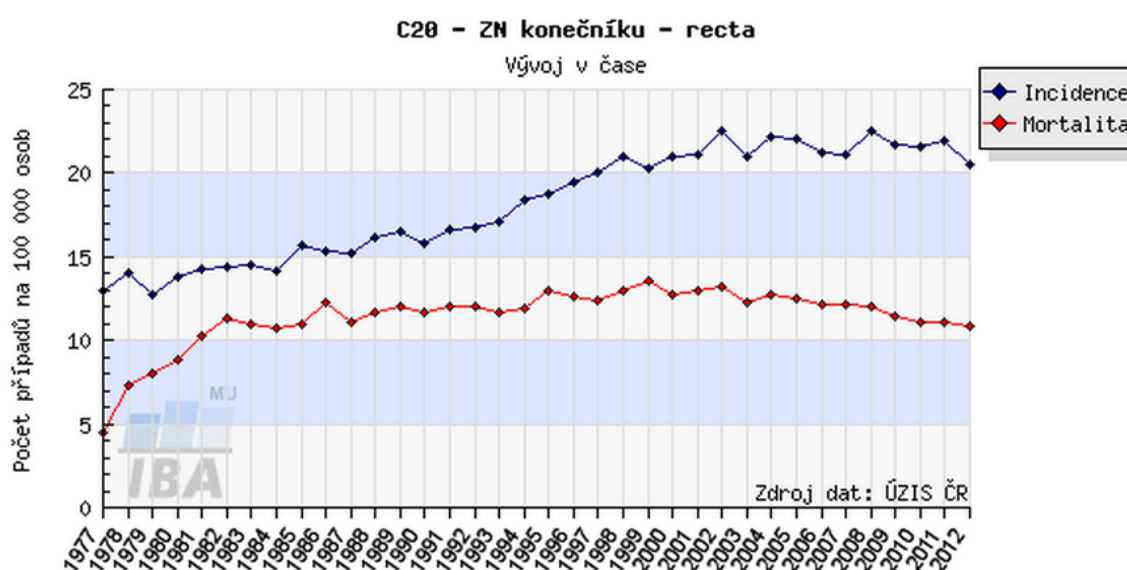
Poslední část trávicí soustavy je tvořena konečníkem (rectum) s řitním otvorem (anem), jak ukazuje obrázek č. 1. Tyto struktury se nacházejí v malé pánvi, rektum je dlouhé cca 12–16 cm a 4 cm široké a je opatřené svěrači – vnitřní svěrač je vůlí neovlivnitelný z hladké svaloviny, vnější je pak tvořen kosterním svalstvem a je možné ho vůlí ovlivnit. V ampuli rekta uzavřené svěračem se shromažďuje stolice, která je z těla odstraněna procesem zvaným defekace. Rostoucí náplní se stěny konečníku rozšiřují a stahové receptory (nervová zakončení) ve stěně konečníku napomohou relaxaci vnitřního hladko-svalového análního svěrače, který není ovlivnitelný vůlí. Současně je zajištěn stah vnějšího vůlí ovlivnitelného análního svěrače, který je inervován ze sakrální (křížové) pleteně.[1]



Obrázek 1.: Rektum [1]

Rakovina konečníku bývá také označována jako kolorektální karcinom. Kolorektální karcinom je v civilizovaných zemích nejčastějším karcinomem u mužů po karcinomu plic a u žen po karcinomu prsu. V České republice dokonce zaujímá první místo ve výskytu tohoto onemocnění. Ročně umírá u nás asi 36 osob na 10000 obyvatel. Toto vysoké číslo je dáno především pozdní diagnostikou, jelikož příznaky se projevují poměrně pozdě, a to v pokročilém stádiu onemocnění. Pokud je karcinom diagnostikován včas, je onemocnění v současné době dobře léčitelné. Záleží tedy hlavně na včasnosti diagnózy a léčby. [2], [3]

Na obrázku č. 2, který následuje pod tímto odstavcem, lze pozorovat časový vývoj hrubé incidence (počet nových případů na 100 000 osob) a hrubé mortality (počet úmrtí na diagnózu na 100 000 osob) pro zvolenou diagnózu v celé populaci. [4]



Obrázek 2.: Časový vývoj onemocnění [4]

Tato forma rakoviny se řadí mezi velmi nepříjemná onemocnění, která mohou vést k obrovským zdravotním potížím pacienta; v nejhorším případě může být následek choroby i smrt. Rakovina konečníku má celou řadu příčin. Při vzniku kolorektálního karcinomu se prolínají vlivy dědičné s vlivy zevního prostředí. Odhaduje se, že až 25 % rakoviny konečníku a tračníku má dědičný základ. Velký podíl vzniku pak zabírají i vnější vlivy.[2], [3]

Rozdělení vývoje karcinomu rekta do stádií shrnuje následující tabulka č. 1.

Tabulka 1: Rozdělení karcinomu rekta do stádií[18]

TNM	stádium	šíření
Tis N0M0	0	ca in situ: intraepiteliální nebo invaze do lamina propria
T1-2 N0 M0	I	submukosa, tunica muscularis propria
T3-4 N0 M0	II	subserosa /perirektální tkáň, perforuje viscerální peritoneum nebo porušuje jiné orgány
T1-4 N1-2 M0	III	postižení regionálních uzlin
T1-4 N1-2 M1	IV	vzdálené metastázy

Jelikož je léčba metastáz velice komplexní, záleží především na jejím charakteru a místě, kde se metastázy nachází. Proto není jednoduché přesně vymezit postup léčby a druh použité terapie. V našem expertním systému tedy není M-klasifikace zohledňována.

3. Léčba karcinomu rekta

3.1. Léčba dle stádií

Léčba karcinomu rekta vždy závisí na charakteristice tumoru. Obecně se postupuje podle toho, v jakém stádiu se rakovina nachází.

Stádium 0 (Tis N0 M0)

– chirurgický výkon nebo polypektomie (odstranění polypu) do zdravé tkáně, bez adjuvantní léčby

Stádium I (T1-2 N0 M0)

– transabdominální resekce nebo transanální excize,

T1-2N0M0 → bez adjuvantní léčby, T1-2N1-2M0 (st.III) → adjuvantní RCHT+ adj.CHT

Stádium II (T3-4 N0 M0)

– neoadjuvantní CHRT, chirurgický výkon, adjuvantní léčba

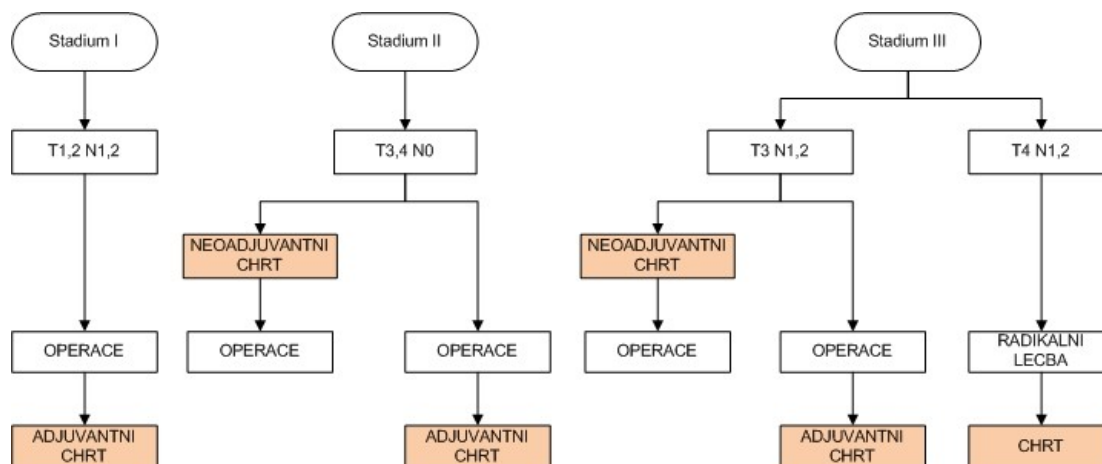
Stádium III (jakékoliv T N1-2 M0)

– neoadjuvantní CHRT, chirurgický výkon, adjuvantní léčba [18]

Neoadjuvantní CHRT (chemoradioterapie) se skládá z radioterapie a konkomitantní chemoterapie: kapecitabin, 5 - týdenní režim, operace za 6–8 týdnů od ukončení radioterapie. Kapecitabin 2× denně po celou dobu radioterapie, 825 mg/m². Přesvětření před operací je v režii chirurga (MRI pánve, CT, rektoskopie, endosono). [18]

Adjuvantní CHRT – pokud nebyla předoperační neoadjuvantní CHRT, přistupuje se k pooperační adjuvantní CHRT s kapecitabinem. Celková doba adjuvantní CHT je 6 měsíců (včetně předoperační pooperační CHRT). [18]

U stádia 0 se nevyžaduje chemoterapie ani radioterapie, proto toto stádium pro náš expertní systém vynecháme. Zjednodušené rozdělení a postup léčby ukazuje obrázek č. 3.[18]



Obrázek 3.: Zjednodušené schéma postupu léčby karcinomu rekta

3.2. Chirurgická léčba

Jedinou kurativní metodou u těchto nádorů je chirurgická léčba. Jejím cílem je radikální odstranění nádoru spolu s regionální lymfatickou drenáží (kurativní resekce).

Výběr operačního výkonu závisí na výšce uložení nádoru nad řitním otvorem, na jeho velikosti, patologicko - anatomické podobě (polypoidní, infiltrativní), stupni diferenciacie a stádiu nádorového onemocnění. Staging je stanovený digitálním a endoskopickým vyšetřením, pomocí CT, MR a endorektální ultrasonografií. Rozhodujícími faktory jsou i věk, somatický stav a přidružená onemocnění: pochopitelná je snaha o zachování kontinence. [5]

Operační mortalita kontinentních resekcí amputačních výkonů činí 2–8 %. Pětileté přežití nezávisí na typu operace, ale na stádiu nádorového onemocnění; uvádí se mezi 52 % (resekce) a 55 % (amputace). Lokální recidivy se vyskytují asi v 15 % a někdy je možné doplnit po resekcí amputační výkon. [5]

3.3. Chemoterapie

Karcinom rekta se v klinickém průběhu liší od nádorů lokalizovaných nad peritoneální reflexí. Je to především zvýšenou frekvencí lokoregionálních recidiv. Je to pravděpodobně způsobeno jak stísněnějšími poměry v pánevní oblasti, která nedovoluje takový stupeň radikality resekcího výkonu jako u vyšších úseků střeva, tak absencí viscerálního peritoneálního listu jako další bariéry šíření nádoru. Proto v této lokalizaci má vedle adjuvantní chemoterapie význam i adjuvantní radioterapie. Pouze užití obou modalit přináší signifikantní prodloužení celkového i bezpříznakového přežití ve srovnání s rameny jen chirurgického léčení, chirurgie s radioterapií, nebo chirurgie s chemoimunoterapií. [5]

3.3.1. Neoadjuvantní chemoterapie

Neoadjuvantní CHT je významná u nádorů s hraniční operabilitou s cílem zlepšení či umožnění operability primárního nádoru, kde se většinou kombinuje s radioterapií. [6]

3.3.2. Adjuvantní chemoterapie

Adjuvantní chemoterapie je léčení pacienta po chirurgickém odstranění zjištěných nádorových ložisek, případně po destrukci zjištěného nádoru, např. radioterapií. [5]

Doporučuje se u primárních nádorů ve stádiu T4 a při postižení regionálních lymfatických uzlin, u nemocných ve II. a III. klinickém stádiu. Základem chemoterapie je 5-fluorouracil kombinovaný s leucovorinem. Pro snížení možných recidiv je adjuvantní CHT doplněna o adjuvantní RT. Tato kombinace přináší zlepšení naděje na celkové přežití. [6]

3.3.3. Paliativní chemoterapie

Paliativní chemoterapie nachází významné postavení při léčbě pokročilých, recidivujících nebo metastatických nádorů s nepředpokládaným kurativním efektem. Cílem je dosažení co nejlepšího terapeutického výsledku při minimální toxicitě nemocného. Díky novým cytostatikům lze očekávat i zlepšení kvality života, prodloužení progresy onemocnění a celkovou dobu přežití. [6]

3.3.4. Chemoradioterapie

Kombinace RT a CHT, léčba lokoregionální a systémová, přináší spoustu výhod. Cytostatika mohou působit systémově zesilovat účinek záření a působí radiosenzibilizačně. Nevýhodou této metody je vyšší výskyt nežádoucích účinků. Indikuje se jako neoadjuvantní léčba u primárně inoperabilních nádorů, jako adjuvantní léčba nebo jako definitivní terapie neoperabilních nádorů. [6]

3.4. Radioterapie

Radioterapie doplňuje operační výkony a uplatňuje se také v paliativní léčbě u inoperabilních nádorů a lokálních recidiv. V malém počtu případů se v léčbě karcinomů rekta setkáváme s brachyterapií (adjuvantně, paliativně a kurativně) a vzácně s intraoperační radioterapií. Adenokarcinomy rekta patří mezi středně radiosenzitivní nádory, které závisí na dávce záření. Zevní radioterapie je indikována pro nádory rekta a rektosigmatu ve vzdálenosti 20–25 cm od anu. [7]

3.4.1. Neoadjuvantní radioterapie

Předoperační (neoadjuvantní) RT je vhodná pro nádory s vysokým rizikem lokoregionálních recidiv. Redukuje množství extrapelvických metastáz a pánevních recidiv, zmenšuje rozsah nádoru (downstaging) a usnadňuje tak operabilitu. Indikuje se u lokálně rozsáhlých nádorů T3, T4, v případě průkazu patologických lymfatických uzlin, u nízko sedících nádorů a u hraničně resekabilních a neresekabilních tumorů. Na oblast malé pánve se standardní frakcionací ($5 \times 1,8$ – 2 Gy za týden) aplikuje 44–45 Gy, poté se může ještě cíleně ozářit (boost) objem tumoru dávkou 5–6 Gy. Akcelerované režimy RT („zkrácené“) se aplikují u pacientů s operabilními nádory s výhodou redukce možnosti intraoperační diseminace. Na oblast malé pánve se aplikuje 5×5 Gy a operaci je nutné provést do 72 hodin od ukončení ozařování, než se projeví akutní toxicita. [7]

3.4.2. Adjuvantní radioterapie

Pooperační (adjuvantní) RT s frakcionací ($5 \times 1,8$ – 2 Gy za týden, celkem 46–50 Gy) se využívá u nádorů rozsahu pT3 a pT4, při průkazu postižení lymfatických uzlin. Nevýhoda spočívá ve vyšší akutní i pozdní toxicitě. [7]

3.4.3. Intraoperační radioterapie (IORT)

Intraoperační radioterapie se využívá jen vzácně, v České republice se neprovádí. Během chirurgického výkonu se jednorázově aplikuje dávka 8–15 Gy, která je pooperačně doplněna adjuvantní zevní radioterapií. Indikuje u lokalizovaných tumorů s vysokým rizikem lokální recidivy. Výhoda spočívá v možnosti aplikace vysoké dávky do lůžka tumoru bez zvýšení rizika poškození okolních zdravých tkání. [7]

3.4.4. Kombinace neoadjuvantní a adjuvantní radioterapie

Kombinace předoperační a pooperační radioterapie, tzv. sandwich technika, byla zavedena za účelem spojit efekt rychlého předoperačního ozáření s předpokládaným účinkem pooperační radioterapie. Uplatňuje se u karcinomu rekta šířícího se do perirektálních tkání lymfatických uzlin. [7]

4. Rozhodování o výběru vhodné terapie

Rozhodování o typu a aplikaci vhodné terapie standardně provádí odborný lékař, který tento problém řeší na základě svých znalostí a zkušeností. Základem pro jeho rozhodování je subjektivní mentální model, který získal v průběhu své praxe. Pro rozhodování může lékař zvážit a použít hlediska, která jsou uvedena v následujícím textu.

4.1. Karnofského index (KI)

Karnofského index má hodnoty od 100 do 0, kde 100 je „perfektní“ zdraví a 0 je smrt. Přestože je škála popsána v intervalech po 10, může lékař podle potřeby měnit skóre i v rozmezí těchto hodnot. Skóre je pojmenováno po dr. Davidu A. Karnofském, který tuto škálu popsal společně s dr. Josephem H. Burchenalem v roce 1949.[8]

- 100 % – normální stav, bez obtíží, bez známek onemocnění
- 90 % – schopen normální aktivity, velmi málo symptomů
- 80 % – schopen normální aktivity s mírnými obtížemi, symptomy
- 70 % – soběstačný, neschopen normálních aktivit či práce
- 60 % – občas vyžaduje pomoc, zvládá většinu osobních potřeb
- 50 % – často potřebuje pomoc, často vyžaduje lékařskou péči
- 40 % – invalidita, vyžaduje speciální péči a pomoc
- 30 % – těžká invalidita, indikace k přijetí do nemocnice
- 20 % – těžce nemocný, potřeba urgentní hospitalizace, vyžaduje podpůrná opatření a léčbu
- 10 % – moribundní, rychle progredující fatální onemocnění
- 0 % – smrt

4.2. TNM klasifikace

TNM klasifikace stanovuje klinické stádium (staging) karcinomu rekta a je základem pro onkologickou praxi.

Její rozdělení ukazuje tabulka č. 2.

Tabulka 2: Rozdělení TNM klasifikace [5]

T	– primární nádor
T1	nádor postihuje submukózu
T2	nádor postihuje muscularis propria
T3	nádor se šíří přes muscularis propria do subserózy nebo do neperitonealizované perikolické nebo perirektální tkáně
T4	nádor se šíří přímo do jiných orgánů nebo struktur a/nebo perforuje viscerální

peritoneum
N – regionální mízní uzliny N1 metastáza v 1–3 perikolických nebo perirektálních mízních uzlinách N2 metastázy ve 4 nebo více perikolických nebo perirektálních mízních uzlinách N3 metastázy podél vaskulárních kmenů
M – vzdálené metastázy M1 přítomnost vzdálených metastáz

4.3. Místo ozáření a druh radioterapie

Místo ozáření se liší podle druhu radioterapie, rozlišujeme tedy neoadjuvantní (předoperační), adjuvantní (pooperační) a radikální ozařování.

4.3.1. Adjuvantní

Výhodou je přesná znalost rozsahu nádoru na podkladě operačního nálezu a histopatologického vyšetření. Nevýhodou je snížení oxygenace v chirurgickém lůžku, která omezuje účinnost radioterapie, větší objem ozářené části tenkého střeva a potřeba rozšířit ozářený objem po abdominoperineální resekci na perineální jizvu. [5]

Ozařuje se tedy místo oblasti malé pánve a lůžko tumoru/anastomóza.

4.3.2. Neoadjuvantní

V tomto případě se ozařuje oblast malé pánve.

Zmenšení nádorové masy je možné dosáhnout pouze při vyšší celkové dávce radioterapie a dostatečném časovém prostoru, aby se mohla klinicky projevit. [5]

4.3.3. Radikální

K radikální léčbě se přistupuje v případě, kdy je pacient inoperabilní z důvodu rozsahu tumoru nebo interních kontraindikací. Ozařuje se celá oblast malé pánve včetně tumoru.

4.4. Vzdálenost důležitých orgánů od nádoru

4.4.1. Střevní sliznice

Tenké střevo je postiženo při ozařování břicha a pánve. Sliznice tenkého střeva je nejcitlivější součástí gastrointestinálního ústrojí. Již po aplikaci nízkých dávek dochází k překrvení a edému sliznice, snadno se vytvářejí vředy. Tím je porušena resorpce, zrychlena peristaltika, změněno mikrobiální složení ve střevním objemu. Příznaky poškození závisí na velikosti dávky, frakcionaci a objemu. Pacienti trpí nechutenstvím, nevolností a průjmem, enteritidou s bolestmi břicha či krvácením do trávicího ústrojí. Přestože je sliznice tračníku a konečníku odolnější k záření, popisují se podobné změny jako na tenkém střevě. Vzniká proktokolitida provázená průjmy, tenesmy nebo krvácením. Poškozením všech vrstev orgánu vzniká vřed s rizikem krvácení nebo perforace. Některé se objevují hned, jiné po dlouhé latenci (5–6 let). Velkým rizikem je vznik chronických vředů, stenóz a píštělí.[9]

4.4.2. Močový systém

Při ozařování malé pánve pro nádory konečníku, prostaty, děložního hrdla nebo močového měchýře dochází k poškození urogenitálního systému. Velmi citlivé jsou ledviny a nefritida vzniká za 6 měsíců až 1 rok. Projevuje se anémií, hypertenzí, albuminurií, bolestmi v bederní oblasti, otoky kotníků a únavou. Této reakci se lze vyvarovat především stíněním ledvin. Močový měchýř je radiorezistentní orgán. Akutní radiální cystitida se objevuje za 4–6 týdnů po skončení radioterapie, bývá provázena častým močením (polyurie), nucením na moč (polakisurie) a pálením při močení. Po aplikaci vyšších dávek vznikají ulcerace a po ozáření celého močového měchýře těžké hemoragické cystitidy v období 3 měsíců – 10 let po RT.[9]

4.4.3. Reprodukční orgány

Reprodukční orgány patří k velmi radiosenzitivním tkáním. U mužů jsou nejcitlivější spermatogonie, méně spermatocyty a ještě méně spermie. U žen jsou radiosenzitivní vajíčka, granulózové buňky a přechodné folikuly. [9]

5. Systémy pro podporu rozhodování

Jedním z cílů diplomové práce je navrhnout počítačovou formalizaci mentálního modelu odborného lékaře (experta) a jeho prezentaci v počítačovém rozhodovacím systému tak, aby (při respektování zásad vědního oboru Umělá inteligence) dával systém obdobně kvalitní rozhodnutí jako úsudek experta. K tomu jsou určeny expertní systémy, jejichž principy jsou popsány v následující kapitole.

5.1. Rozhodování a umělá inteligence

Kvalita lidských rozhodnutí je dána komplexem mentálních schopností člověka, které řadíme do pojmu jeho lidské inteligence. Budeme-li pak od stroje požadovat (počítače), aby při řešení stejné situace poskytl stejně kvalitní rozhodnutí, pak musíme transponovat pojem inteligence lidské na pojem inteligence stroje, tedy inteligence umělé. [11]

Tato vědní disciplína se zabývá metodami a prostředky, které dosahují při řešení složitých problémů stejně kvalitních výsledků, jako inteligentní člověk.

Ukazuje se, že pro konstrukci inteligentních postupů je zcela relevantní využití znalostí. Znalosti mohou být získány jednak převzetím od člověka, který je schopen úlohu inteligentně řešit (tedy nutně experta v daném oboru), jednak analýzou příkladů a jejich inteligentních řešení.

Lidské znalosti můžeme rozdělit do dvou skupin. Předně jsou to znalosti objektivní, obecné či exaktní (někdy nazývané také znalosti hluboké), k nimž mají přístup odborníci např. při studiu daného oboru (teorémy, fyzikální zákony apod.). Druhou skupinu tvoří znalosti subjektivní, často heuristické až meta-heuristické (někdy nazývané znalosti mělké – nikoli však ve smyslu povrchní), získané vlastním poznáním a dlouholetou praxí. Ukazuje se, že pro kvalitu řešení z hlediska umělé inteligence sehrávají tyto subjektivní znalosti podstatnou roli. [14]

5.2. Expertní systémy

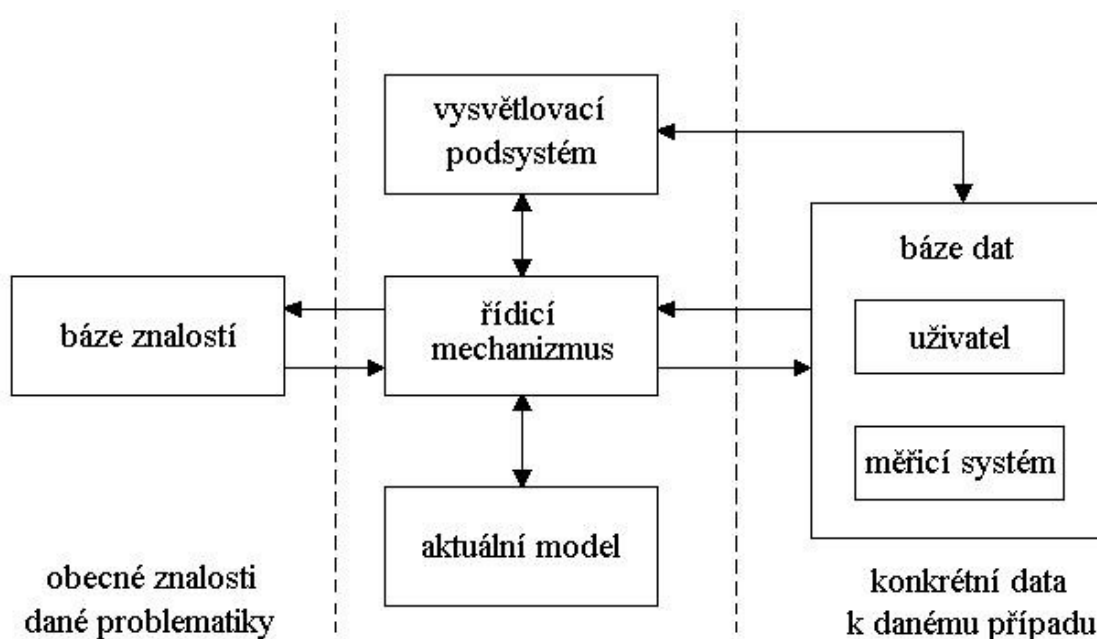
Jedním z nejrozšířenějších nástrojů umělé inteligence jsou expertní systémy [12], [13].

Expertní systémy jsou určeny pro podporu rozhodování při řešení složitých situací a jsou nejvýraznějším příkladem využití metod umělé inteligence v praxi. Těží ze znalostí převzatých od experta a používají procedury, které se využívají při řešení konkrétního problému – obdobně jako člověk-expert. Pro kvalitu rozhodování

expertního systému mají zvláštní důležitost specifické až heuristické znalosti, které expert získává praxí.

Expertní systémy lze definovat jako počítačové programy, které simulují rozhodovací činnost expertů při řešení velmi složitých, úzce problémově zaměřených úloh. Jsou založeny na myšlence převzetí znalostí od experta (zejména jeho znalostí subjektivních) a jejich vhodné počítačové reprezentace, která by umožnila počítačovému programu využívat těchto znalostí zhruba stejným způsobem, jako jich využívá expert.

Nejrozšířenějším typem expertních systémů jsou expertní systémy diagnostické. Jsou určeny pro efektivní interpretaci dat s cílem určit, která z hypotéz (z předem stanovené konečné množiny hypotéz) nejlépe koresponduje s aktuálními daty týkajícími se konkrétního řešeného případu. Typickým použitím může být v tomto případě např. lékařský diagnostický nebo terapeutický systém pro určení druhu či způsobu léčení pacientovy choroby na základě vyhodnocení jeho subjektivních potíží. Typickou architekturu diagnostického expertního systému shrnuje obr. č. 4.



Obrázek 4.: Typická architektura diagnostického expertního systému

Úlohou diagnostických expertních systémů je provádět efektivní interpretaci dat s cílem určit, která z hypotéz o chování zkoumané soustavy nejlépe koresponduje s reálnými daty. Řešení případu (problému) probíhá formou postupného ohodnocování a přehodnocování dílčích hypotéz v rámci pevně daného modelu řešeného problému, který je sestaven expertem.

Popsaný diagnostický expertní systém bude v řešení tématu diplomové práce použit jako systém rozhodovací.

5.3. Teoretické principy použitých metod

5.3.1. Vágnost a fuzzy množiny

Základní myšlenka expertního systému spočívá ve využití v počítači uložených kvalitních znalostí experta k řešení úloh z jeho oboru v případě, že expert není v daném okamžiku k dispozici (například když zkušený a vynikající lékař, primář špičkového pracoviště, odešel do důchodu). Řekli jsme, že kvalita expertního systému je dána především kvalitou znalostí a efektivitou jejich počítačové reprezentace.

Ať již jsou znalosti uloženy v bázi znalostí jakýmkoliv způsobem, vždy jsou získány „extrakcí“ zdroje, tj. od experta. Nejpřirozenějším a nejoperativnějším vyjádřením takových znalostí je přirozený jazyk ať už v ústní nebo písemné formě. Dále bylo praxí prověřeno, že snad nejefektivnější formou vyjádření lidských znalostí (např. o chování nějakého objektu) jsou produkční pravidla typu JESTLIŽE-PAK. Ukazuje se, že souborem takových pravidel lze popsat chování libovolně složité soustavy. [15], [16]

Produkční pravidla, vyslovená v přirozené řeči, jsou složena ze slov přirozeného jazyka. Základní vlastností slovních pojmů je jejich pojmová neurčitost –**vágnost**. Jazykový pojem „zvýšená teplota“ je vágní, v daném kontextu (rozsah teplot) jej však odborník dovede dobře vyhodnotit a efektivně použít. Pokud požadujeme po expertním systému, aby podobně dobře operoval se znalostmi, a jsou-li tyto znalosti formulovány produkčními pravidly s využitím jazykových popisů, stojíme nutně před problémem nalezení vhodného nástroje pro počítačovou formalizaci jejich pojmové neurčitosti, tedy vágnosti.

Nejrozšířenějším způsobem formalizace vágních pojmů jako formalizace neurčitosti slov přirozeného jazyka se v praxi staly tzv. fuzzy množiny.

Stupeň příslušnosti (náležení) prvku univerza U do klasické množiny A je dán funkcí [16]

$$\gamma_A : U \rightarrow [0,1]. \quad (1)$$

Její velikost může nabývat dvou hodnot:

- stupeň příslušnosti 0 – prvek do množiny A (plně) nenáleží
- stupeň příslušnosti 1 – prvek do množiny A (plně) náleží.

V převážné většině praktických případů lze jen obtížně tvrdit, že určitý prvek do určité množiny náleží či nenáleží. I když prvek nese dominantní znaky vlastností prvků určité množiny A , může ve více méně menší míře vykazovat také znaky vlastností množiny B . Rozhodnutí o přiřazení prvku do množiny A je pak nejednoznačné.

Tato situace je typická i pro vágní charakter významu slov. Diference mezi pojmy „nízký“ a „vysoký“ není chápána jako ostrá, soubory objektů nízkých a vysokých nelze formalizovat ostrými obyčejnými množinami.

Situaci může efektivně řešit přístup, v němž kromě pojmu absolutního nálezení či nenálezení prvku do určité množiny zavedeme pojem částečného nálezení prvku do množiny. Jde zřejmě o zobecnění pojmu stupně příslušnosti (1), kdy rozšíříme definiční obor jeho hodnot ze dvou diskrétních (0, 1) na uzavřený interval $<0, 1>$

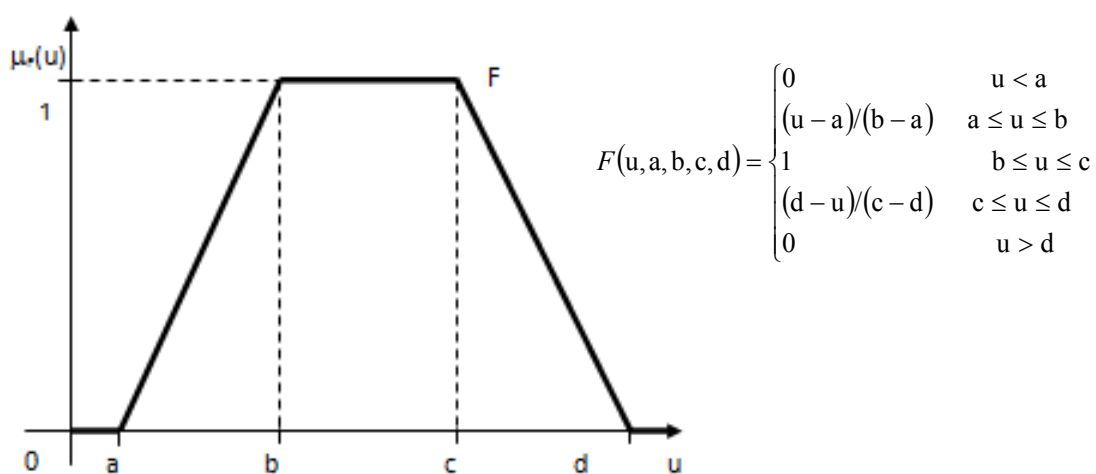
$$\mu_F : U \rightarrow \langle 0, 1 \rangle. \quad (2)$$

Množiny, které umožňují definovat velikost stupně nálezení prvků podle (2) se nazývají fuzzy množiny [16].

Fuzzy množina F je definována jako přiřazení, které každému prvku u univerza U přiřazuje hodnotu funkce jeho příslušnosti do fuzzy množiny F rovnou $\mu_F(u)$

$$F = \{(\mu_F(u))/u \in U\}. \quad (3)$$

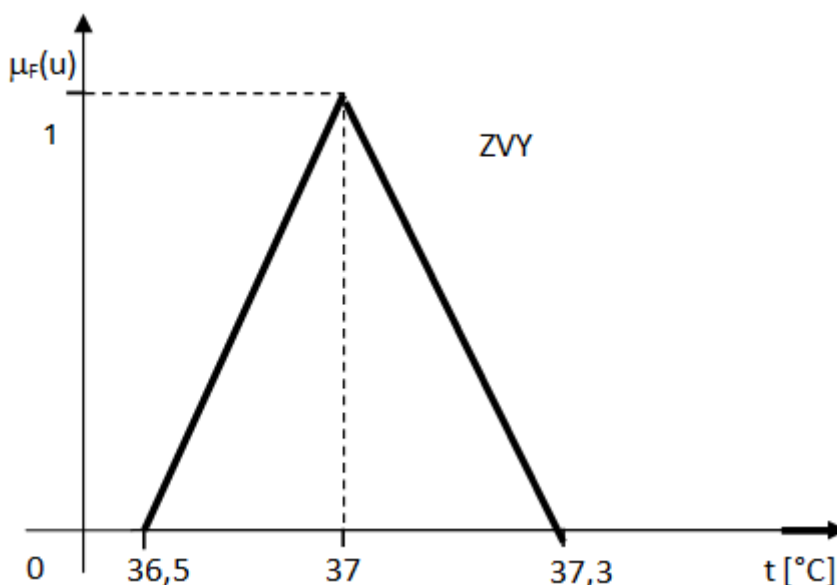
V praxi je fuzzy množina F prvků u ztotožněna s její funkcí příslušnosti $\mu_F(u)$. V praxi používáme nejčastěji její aproximaci lomenými přímkami. Příklad nejrozšířenější lichoběžníkové aproximace a její analytické vyjádření je uvedené na obr. č. 5. Funkce příslušnosti je parametrizována jejich čtyřmi body zlomu, tedy hodnotami $[a, b, c, d]$.



Obrázek 5.: Lichoběžníková aproximace funkce příslušnosti

Pokusme se popsat pomocí fuzzy množiny vágní pojem „zvýšená teplota“ pacienta. Každé tělesné teplotě, která připadá v úvahu, přiřadíme číslo $\langle 0,1 \rangle$ vyjadřující stupeň našeho přesvědčení, že taková teplota je „mírně zvýšená“. Tento stupeň vyplývá z toho, jak rozumíme pojmu „zvýšená teplota“, jak hluboká je v tomto ohledu naše zkušenost nebo jak dalece jsme v této oblasti experty. Přiřazení takových stupňů (stupňů příslušnosti) závisí tedy na subjektu a také na kontextu. Proto je přiřazení funkce příslušnosti prvkům fuzzy množiny z principu subjektivní a odráží obecně koncept, z něhož je problém posuzován.

Definujme tvar funkce příslušnosti fuzzy množiny, formalizující vágní pojem „zvýšená teplota“. Jednou z možností znázornění takové fuzzy množiny je grafický způsob – na vodorovnou osu budeme zadávat teploty, na svislou osu odpovídající stupně příslušnosti. Možná definice je zobrazena na obr. č. 6.



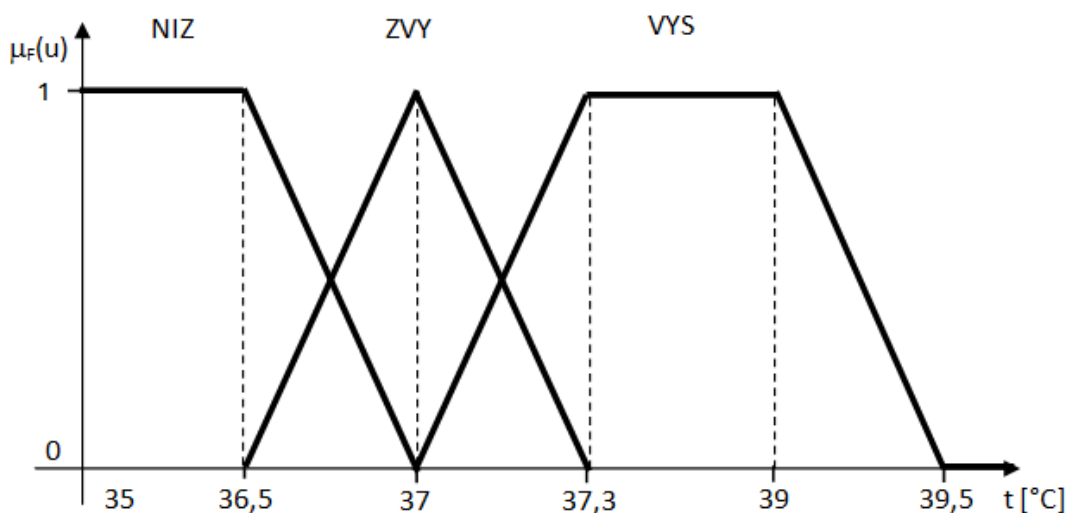
Obrázek 6.: Jedna z možností znázornění fuzzy množiny

Je zřejmé, že kromě teploty 37°C , která do fuzzy množiny zvýšených teplot ZVY náleží zcela určitě, existují hodnoty, které do této fuzzy množiny zvýšených teplot náleží se sníženým stupněm $(0,1)$, konkrétně intervaly $(36,5, 37,0)$ a $(37,0, 37,3)$. Tak lze vyjádřit kromě absolutního náležení (či nenáležení) prvku do fuzzy množiny také stupeň jeho náležení částečného. Tato formalizace problému významu slov je, jak bude uvedeno dále, dobře použitelná.

Tělesná teplota může figurovat v rozhodovacím systému jako jedna ze vstupních proměnných. Jelikož se jedná o jazykové systémy (nikoli matematické), jsou její hodnoty definovány nikoliv číselnými údaji, ale jazykovými kvantifikátory (teplota nízká, zvýšená, vyšší, vysoká apod.). Pokud budou tyto jazykové kvantifikátory využívány k rozhodování v počítačovém programu, musí být jejich slovní význam

vhodným způsobem počítačově (tedy numericky) formalizován. Pro formalizaci významu slov budeme v našem řešení používat fuzzy množiny.

Jako příklad formalizace více jazykových hodnot jazykové proměnné „tělesná teplota” TEP můžeme uvést případ, kdy bude nabývat tří jazykových hodnot „nízká” NIZ, „zvýšená” ZVY a „vyšší” VYS. Tyto tři jazykové hodnoty jsou reprezentovány třemi fuzzy množinami NIZ, ZVY a VYS podle obr. č. 7.



Obrázek 7.: Tři fuzzy množiny tří jazykových hodnot

Každá jazyková hodnota (fuzzy množina) je pak určena uspořádanou čtveřicí svých parametrů. Uspořádaná čtveřice představuje body zlomu aproximační přímky a čtyři hodnoty tvoří v takovém případě čtyři parametry fuzzy množiny. Pro náš případ se jedná o tyto hodnoty:

NIZ	[35.0, 35.0, 36.5, 37.0]
ZVY	[36.5, 37.0, 37.0, 37.3]
VYS	[37.0, 37.3, 39.0, 39.5]

Formalizace jazykových hodnot proměnné funkcemi příslušnosti podle obr. č. 7 umožňuje vyjádření jak plného náležení teploty do fuzzy množiny $\mu(t) = 1$, tak také částečné náležení teploty do dvou fuzzy množin (jazykových hodnot) s vyjádřením odpovídajících stupňů příslušnosti $\mu(t) \in (0,1)$.

Jazykové proměnné a jejich jazykové hodnoty jsou důležitými pojmy z oblasti jazykového modelování, tedy tvorby báze znalostí expertních systémů.

5.3.2. Jazykové modely a fuzzy-logika

Jádrem expertní systémů je báze znalostí, v níž jsou uloženy formalizované expertní znalosti problémové oblasti, v níž má expertní systém poskytovat podporu při rozhodování. Fuzzy expertní systémy používají pro formalizaci znalostí podmíněných IF-THEN (JESTLIŽE – PAK) pravidel ve formě: [14], [16]

$$\text{IF}(\text{předpoklad, antecedent}) \text{ THEN } (\text{důsledek, konsekvent}) \quad (4)$$

Antecedenty i konsekventy pravidel jsou vágní fuzzy výroky – jejich pravdivostní hodnota leží v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ (Mamdaniho pravidlo).

$$\text{IF}(x \text{ is } A_I) \text{ THEN } (y \text{ is } B_I) \quad (5)$$

Interpretace pravidla vyjadřuje kauzální vztah mezi jazykovými proměnnými x a y . Jinými slovy – jestliže jazyková proměnná x nabude své jazykové hodnoty A_I , důsledkem je stav, kdy jiná jazyková proměnná y nabude své jazykové hodnoty B_I .

Pravidlo (5) je nejjednodušším popisem chování (jazykovým modelem) soustavy s jedním vstupem a jedním výstupem. V praxi pracujeme se soustavami s více vstupy a pravidlo má pak tvar

$$\text{IF } [x_1 \text{ is } A(x_1) \text{ and } x_2 \text{ is } A(x_2) \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A(x_n)] \text{ THEN } [y \text{ is } B(y)] \quad (6)$$

Soubor takových pravidel pak popisuje chování reálné soustavy a tvoří její pravidlový jazykový fuzzy model.

Uvažujme nyní případ modelu (5), kdy víme, že jazyková proměnná x nabude své jiné jazykové hodnoty, např. A_2 , tedy $(x \text{ is } A_2)$. Ptáme se, jaké jazykové hodnoty nabude nyní jazyková proměnná y ?

K odpovědi na tuto otázku použijeme procesu tzv. přibližného usuzování (aproximativní vyvození). Teoretickým zázemím je přitom fuzzy vícehodnotová jazyková logika. [16]

Uvažujme jazykový fuzzy model s pravidly typu Mamdani, jehož struktura je tvořena množinou R - podmíněných jazykových pravidel *JESTLIŽE - PAK* (*IF - THEN*). Tvar r -tého pravidla Mamdaniho fuzzy modelu je pak

$$\text{IF } [x_1 \text{ is } A_r(x_1) \text{ and } x_2 \text{ is } A_r(x_2) \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_r(x_n)] \text{ THEN } [y \text{ is } B_r(y)], \quad (7)$$

kde $r = 1, 2, \dots, R$ je index počtu pravidel modelu.

Fuzzy model je využit ke stanovení jazykových fuzzy hodnot svých výstupních proměnných na základě aktuálních hodnot proměnných vstupních. K tomu jsou využity fuzzy-logické vyvozovací algoritmy [12], [13].

Uvažujme kompoziční vyvozovací algoritmus

$$B^0(y) = R \circ A(x_j^0) \quad (8)$$

kde $B^0(y)$ je vyvozená (výstupní, globální) hodnota z modelu R , R je Mamdaniho pravidlový fuzzy model, \circ je fuzzy relace *kompozice* a $A(x_j^0)$ je vektor aktuálních hodnot vstupních proměnných (dotaz), $j = 1, \dots, n$.

Pravdivostní hodnota j -tého dílčího fuzzy tvrzení o velikosti j -té vstupní proměnné x_j v r -tém pravidle

$$\mu_{r,j} = [A(x_j^0)] \quad (9)$$

Pravdivostní hodnota antecedentu r -tého pravidla je vypočtena jako fuzzy konjunkce jednotlivých fuzzy tvrzení v antecedentu pravidla, interpretovaného jako Godelova konjunkce (minimum), tedy

$$\mu_r = \min_j \{ \mu_{r,j} \} = \min_j [A(x_j^0)] \quad (10)$$

Vyvozená (výstupní, dílčí) hodnota z r -tého pravidla fuzzy modelu R je vypočtena s použitím fuzzy implikační funkce *THEN* interpretované jako Mamdaniho implikační funkce (minimum)

$$B_r^0(y) = \min_y \{ \mu_r, B_r(y) \} = \min_y \{ \min_j [A(x_j^0)], B_r(y) \} \quad (11)$$

Vyvozená (výstupní, globální) hodnota z modelu fuzzy modelu R je vypočtena za předpokladu fuzzy disjunktivního spojení jednotlivých pravidel modelu, kdy fuzzy disjunkce je interpretována jako Gödelova disjunkce (maximum)

$$B^0(y) = \max_y \{ B_r^0(y) \} = \max_y \{ \min_y \{ \min_j A(x_j^0), B_r(y) \} \} \quad (12)$$

Výstupní jazyková hodnota $B^0(y)$ je defuzzifikována metodou COF (Center of Gravity) do formy obyčejného čísla y^{crisp} [15]

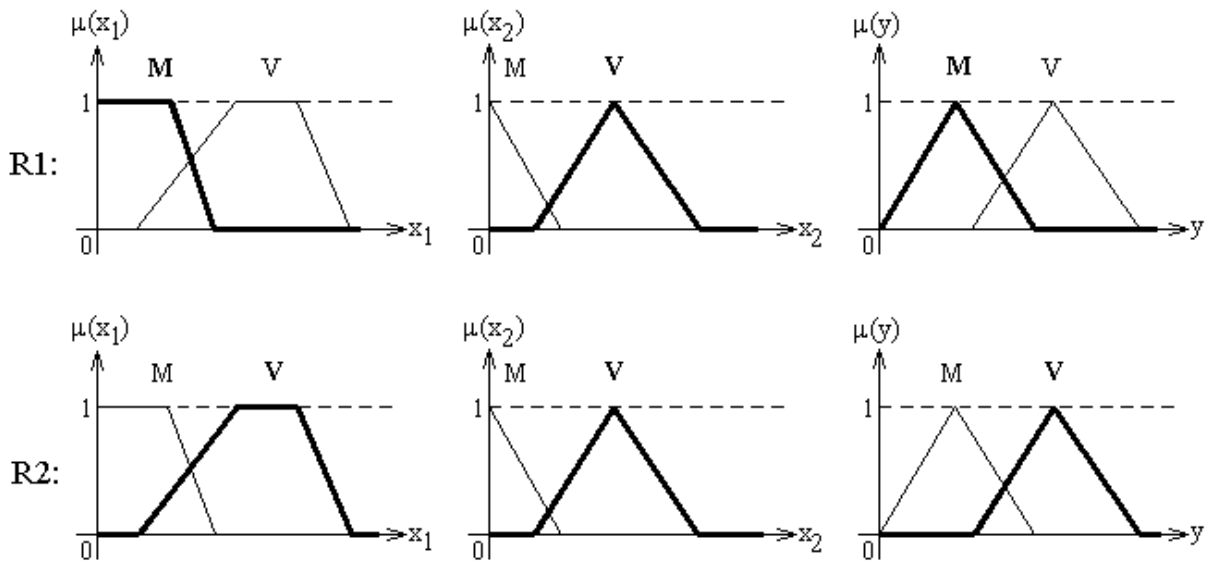
$$y^{crisp} = \frac{\int_Y y \cdot \mu_{B_y} dy}{\int_Y \mu_{B_y} dy} \quad (13)$$

Postup Mamdaniho inference lze dobře znázornit graficky. Uvažujme soustavu s dvěma pravidly fuzzy modelu Mamdani, který bude mít dvě vstupní a jednu výstupní jazykovou proměnnou. Všechny proměnné necht' mají dvě jazykové hodnoty – *MALÝ* a *VELKÝ*.

Sestavíme jazykový model soustavy s použitím dvou pravidel, z nichž první se bude vyjadřovat k situaci, v níž je hodnota výstupní proměnné *MALÁ* a druhé k situaci, v níž je hodnota výstupní proměnné *VELKÁ*.

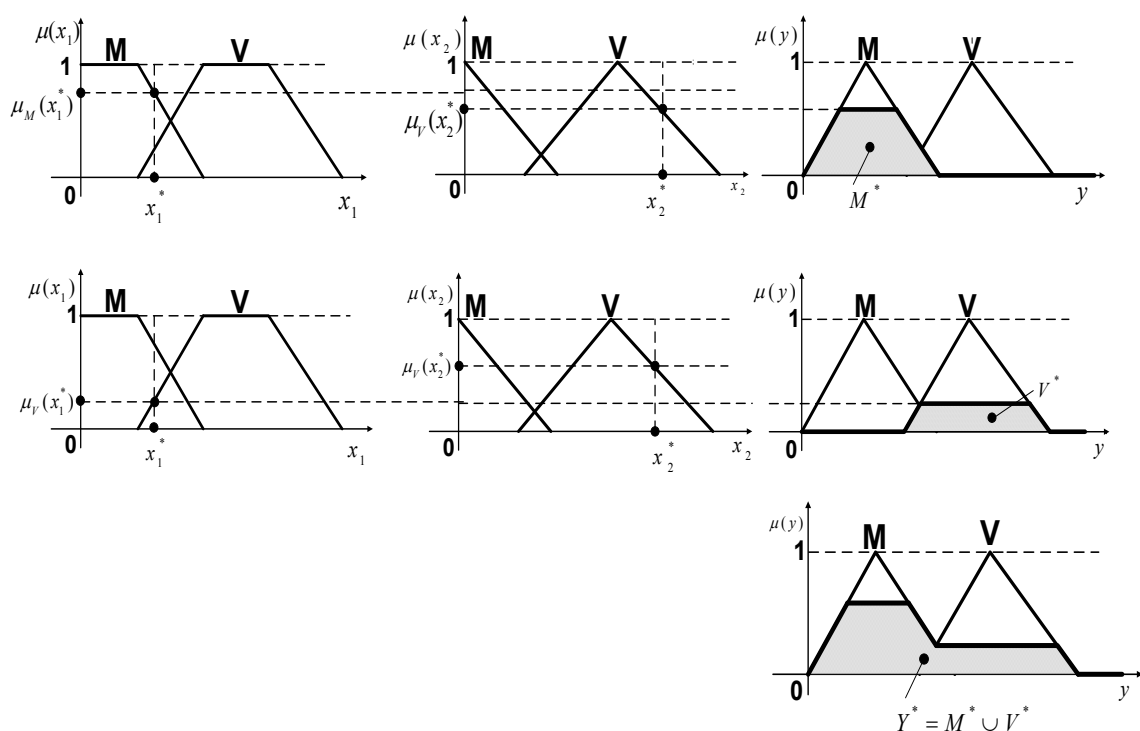
- R₁: IF (x₁ is *MALÝ*) and (x₂ is *VELKÝ*) THEN (y is *MALÝ*)
R₂: IF (x₁ is *VELKÝ*) and (x₂ is *VELKÝ*) THEN (y is *VELKÝ*)

Jazykové proměnné vstupních veličin x₁ a x₂ a výstupní veličiny y jsou zachyceny na obrázku obr. č. 8, který současně graficky reprezentuje obě pravidla modelu.



Obrázek 8.: Grafická reprezentace vstupních a výstupních veličin

Fuzzy množiny jazykových hodnot, které jsou aktuální v jednotlivých pravidlech, jsou zdůrazněny tučnými čarami.



Obrázek 9.: Stanovení tvaru výsledné fuzzy množiny

Stanovení tvaru výsledné fuzzy množiny výstupní proměnné y při uvažování (dosazení) konkrétních hodnot vstupních proměnných x_1 a x_2 postupujeme podle obrázku obr. č. 8 takto:

- Dosazované konkrétní hodnoty vstupních proměnných jsou označeny x_1^* a x_2^* .
- Nejprve zjistíme tvar výstupní fuzzy množiny pro první pravidlo. V souladu se zněním prvního pravidla zjistíme velikost stupně příslušnosti hodnoty x_1^* k fuzzy množině M a označíme jej jako $\mu_M(x_1^*)$. Dále zjistíme velikost stupně příslušnosti hodnoty x_2^* k fuzzy množině V a označíme jej jako $\mu_V(x_2^*)$.
- Porovnáme velikosti $\mu_M(x_1^*)$ a $\mu_V(x_2^*)$ a vybereme menší z nich, tedy $\mu_V(x_2^*)$.
- Touto hodnotou „ořežeme“ jazykovou hodnotu výstupní hodnoty y v prvním pravidle, tedy fuzzy množinu M . Ořezanou fuzzy množinu označíme jako M^* a budeme ji uvažovat jako výstup prvního pravidla.
- Nyní zjistíme tvar výstupní fuzzy množiny pro druhé pravidlo. V souladu se zněním druhého pravidla zjistíme velikost stupně příslušnosti hodnoty x_1^*

k fuzzy množině V a označíme jej jako $\mu_V(x_1^*)$. Dále zjistíme velikost stupně příslušnosti hodnoty x_2^* k fuzzy množině V a označíme jej jako $\mu_V(x_2^*)$.

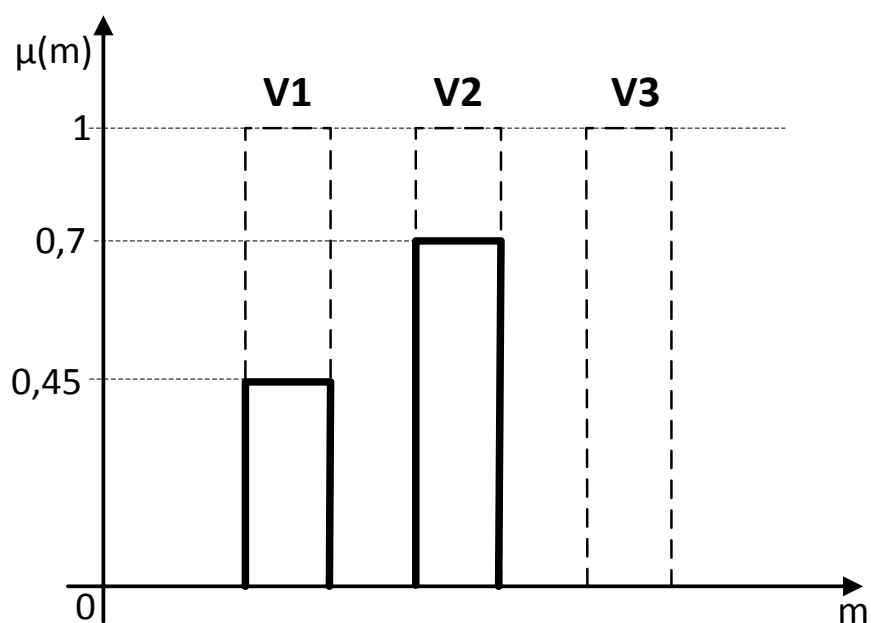
- Porovnáme velikosti $\mu_V(x_1^*)$ a $\mu_V(x_2^*)$ a vybereme menší z nich, tedy $\mu_V(x_1^*)$.
- Touto hodnotou „ořežeme“ jazykovou hodnotu výstupní hodnoty y v druhém pravidle, tedy fuzzy množinu V . Ořezanou fuzzy množinu označíme jako V^* a budeme ji uvažovat jako výstup druhého pravidla.
- Výslednou výstupní fuzzy množinu s uvažováním obou pravidel Y^* získáme sjednocením fuzzy množin M^* a V^*

$$Y^* = M^* \cup V^*$$

Výsledkem přibližného usuzování je tedy fuzzy množina Y^* , kterou můžeme jazykově interpretovat jako „SPÍŠE MALÝ“. Pokud bychom potřebovali výstup ve formě čísla, provedeme tzv. defuzzifikaci fuzzy množiny Y^* .

Zvláštní variantu Mamdaniho jazykového modelu použijeme v úlohách, kdy výstupní proměnná nemá několik jazykových hodnot (formalizovaných fuzzy množinami), nýbrž nabízí několik dílčích řešení (diagnóz), kterým systém na základě dat ke konkrétnímu případu přiřadí ohodnocení číslem z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Tak lze možná řešení seřadit od nejvíce doporučovaného po nejméně doporučované. Jazykové hodnoty výstupní proměnné (diagnózy) mají obvykle tvar obdélníkových funkcí příslušnosti normálních (ostrých) množin a grafický výstup modelu má vzhled sloupcového grafu. Jednotlivé hodnoty (obdélníky) v konsekventech jsou ořezány na úrovních pravdivostních hodnot antecedentů stejně, jako bylo popsáno výše a znázorněno na obr. č. 9.

Tento typ Mamdaniho jazykového modelu demonstrujeme na příkladu. Výstupní hodnota expertního systému pro doporučení nejvhodnější varianty zákroku pro konkrétního pacienta je zachycen na obr. 10. Příklad pracuje se třemi variantami zákroků $V1$, $V2$ a $V3$. Varianty jsou znázorněny čárkovaně. Doporučení systému, který respektuje konkrétní vstupy (hlediska volby zákroku), je vyznačeno plnou čarou. Na prvním místě je doporučen zákrok $V2$ (stupeň 0,7), v úvahu připadá případně i zákrok $V1$ (stupeň 0,45), zákrok $V3$ je pro daného pacienta nevhodný (stupeň 0,0).



Obrázek 10.: Jazykové hodnoty výstupní proměnné – doporučení zákroku

Mamdaniho pravidlový fuzzy model je v diplomové práci v expertním systému pro vyvození doporučení terapie využit. Pro implementaci rozhodovacího fuzzy-logického expertního systému bylo použito programové prostředí prázdného expertního systému LFLC 2000 (Linguistic Fuzzy Logic Controller). [17]

6. Expertní systém pro rozhodování v radioterapii

Základem expertního systému je báze znalostí, která je reprezentována jazykovým pravidlovým fuzzy-logickým modelem řešeného problému. K jeho syntéze je třeba vzít v úvahu postupy experta a strukturu jeho mentálního modelu. V následující části práce jsou rozepsány problémy jeho návrhu, ladění a programové implementace.

6.1. Návrh jazykového modelu a implementace expertního systému v prostředí LFLC

6.1.1. Vstupní jazykové proměnné expertního systému

Celkem bylo navrženo osm vstupních jazykových proměnných. Každá z jazykových proměnných představuje nezbytný údaj pro stanovení správné radioterapeutické dávky. Jsou to hodnoty určující Karnofského index, vzdálenost nádoru od radiosenzitivních orgánů – vzdálenost od močového měchýře, vzdálenost od reprodukčních orgánů a vzdálenost od střevní sliznice, T a N klasifikace nádoru, druh radioterapie a místo ozáření. Tyto údaje jsou interpretovány pomocí jazykových hodnot ve formě fuzzy množin v podobě lichoběžníku a ostře ohraničených množin v podobě obdélníků. Obrázek č. 11 zobrazuje přehledovou tabulku LFLC se vstupujícími proměnnými do systému.

Name	Context
KI	Simple [0; 75; 100]
MOC_MECHYR	Simple [0; 7; 10]
REPRO_ORGANY	Simple [0; 7; 10]
STREVNI_SLIZNICE	Simple [0; 7; 10]
DRUH_RADIOTERAPIE	Simple [0; 1.5; 3.4]
T_KLASIFIKACE	Simple [0; 1.5; 4.6]
N_KLASIFIKACE	Simple [0; 1.5; 3.4]
MISTO_OZARENI	Simple [0; 1.5; 3.4]

Obrázek 11.: Vstupní hodnoty expertního systému

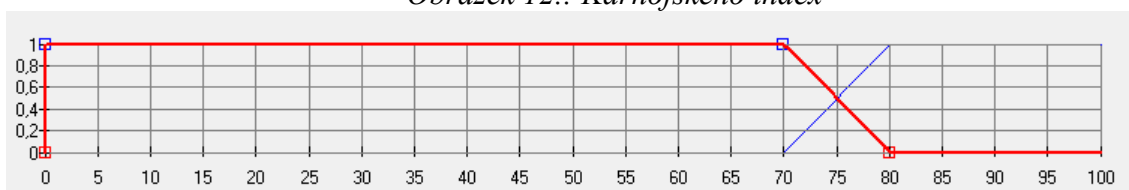
Karnofského index

Vstupní jazyková proměnná označující Karnofského index má jazykové hodnoty uvedené na obrázku č. 12. Byly zvoleny dvě možné vstupní hodnoty, a to KI_NESCHOPNY v případě, kdy pacient není schopen radioterapie a KI_SCHOPNY v případě, že je schopen jakéhokoli lékařského postupu v radioterapii. Byla zvolena

lichoběžníková aproximace se čtyřmi body zlomu – Type: trapezoid (obr. č. 13). Hodnoty uvedené v tabulce představují reálné hodnoty Karnofského indexu, kdy nejmenší hodnota je 0 a nejvyšší pak 100.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	KI_NESCHOPNY	trapezoid	0		0	70		80	Y
2.	KI_SCHOPNY	trapezoid	70		80	100		100	Y
3.	null	trapezoid	0		0	100		100	N

Obrázek 12.: Karnofského index



Obrázek 13.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné Karnofského index

Vzdálenost radiosenzitivních orgánů

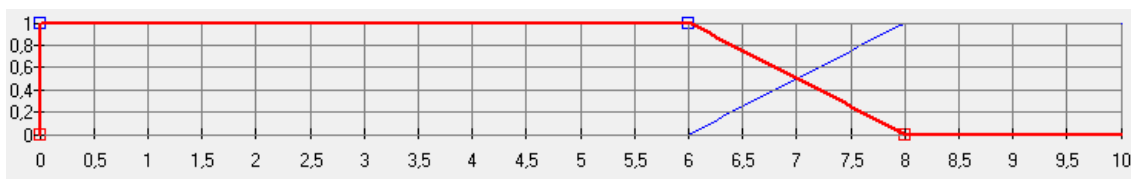
Další proměnné vstupující do systému je vzdálenost močového měchýře, vzdálenost střevní sliznice a vzdálenost reprodukčních orgánů od nádoru udávána v centimetrech s přesností na jedno desetinné místo. V těchto případech pak platí zjednodušené pravidlo, čím je vzdálenost menší, tím je radioterapeutická dávka menší.

Speciální hodnotou je hodnota null, viz obrázek č. 16. Znamená případ, kdy pravidlo pro učení výsledné dávky nevyžaduje znalost této proměnné. Například v případě, kdy se ozařuje celá malá pánev a nezáleží na přesných vzdálenostech těchto orgánů od nádoru. Hodnota null je definovaná na celém intervalu.

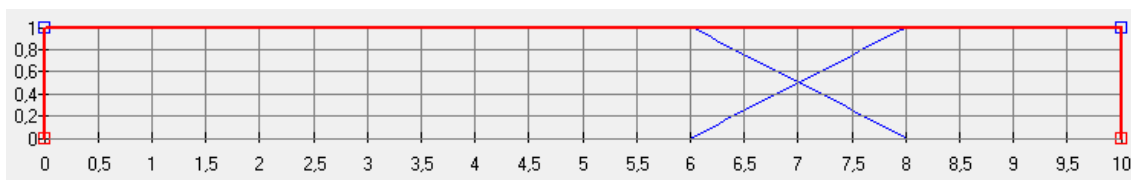
Opět je zvolena lichoběžníková aproximace. Hodnoty 0 až 10 znázorňují vzdálenost v centimetrech. Obrázky č. 14 a č. 15 charakterizují vstupní proměnnou vzdálenost močového měchýře a nabývá dvou hodnot: MOC_VZDALENOST_MALA – kritická vzdálenost ovlivňující výslednou radioterapeutickou dávku a MOC_VZDALENOST_VELKA – dostatečně velká vzdálenost, která neovlivní výslednou dávku.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	MOC_VZDALENOST_MALA	trapezoid	0		0	6		8	Y
2.	MOC_VZDALENOST_VELKA	trapezoid	6		8	10		10	Y
3.	null	trapezoid	0		0	10		10	Y

Obrázek 14.: Vzdálenost močového měchýře



Obrázek 15.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné Vzdálenost močového měchýře

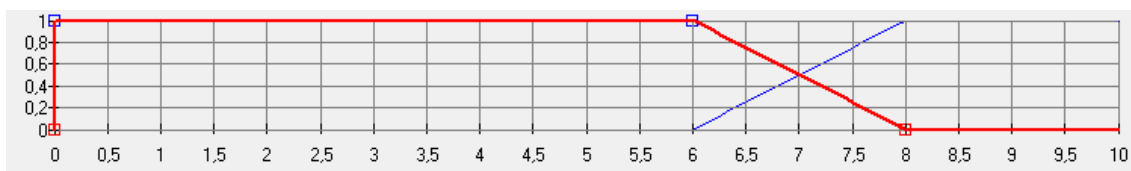


Obrázek 16.: Tvar množiny null

Podobnou vstupní jazykovou proměnnou expertního systému je vzdálenost reprodukčních orgánů vzhledem k nádoru (obr. č. 17 a č. 18). I zde proměnná nabývá dvou hodnot: REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA – vzdálenost, která neovlivní výslednou dávku a REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA – vzdálenost, díky níž se výsledná dávka ovlivní.

Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1. REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	trapezoid	0		0	6		8	Y
2. REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	trapezoid	6		8	10		10	Y
3. null	trapezoid	0		0	10		10	Y

Obrázek 17.: Vzdálenost reprodukčních orgánů

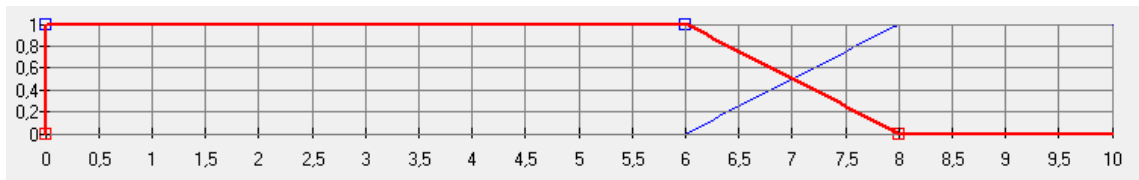


Obrázek 18.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné Vzdálenost reprodukčních orgánů

Poslední vstupující jazykovou proměnnou z řady proměnných určujících vzdálenost je vzdálenost střevní sliznice od nádoru (obr. č. 19 a č. 20). Charakteristika této proměnné je stejná jako u předchozích jazykových proměnných. Proměnná nabývá hodnot STREVNI_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA a STREVNI_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	STREVNI_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	trapezoid	0		0	6		8	Y
2.	STREVNI_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	trapezoid	6		8	10		10	Y
3.	null	trapezoid	0		0	10		10	Y

Obrázek 19.: Vzdálenost střevní sliznice



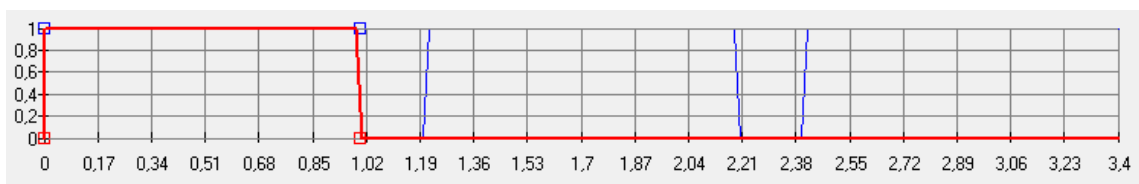
Obrázek 20.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné Vzdálenost střevní sliznice

Druh radioterapie

Vstupní jazyková proměnná druh radioterapie obsahuje tři možné hodnoty druhu radioterapie: PREDOPERACNI, POOPERACNI a RADIKALNI (obr. č. 21 a č. 22). Proto jsou to obyčejné množiny. Tyto hodnoty popisují fázi léčby, v jaké se pacient chystá přistoupit k radioterapii: předoperační radioterapie, pooperační radioterapie či radikální léčba bez operace.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	PREDOPERACNI	trapezoid	0		0	1		1	Y
2.	POOPERACNI	trapezoid	1,2		1,2	2,2		2,2	Y
3.	RADIKALNI	trapezoid	2,4		2,4	3,4		3,4	Y

Obrázek 21.: Druh radioterapie



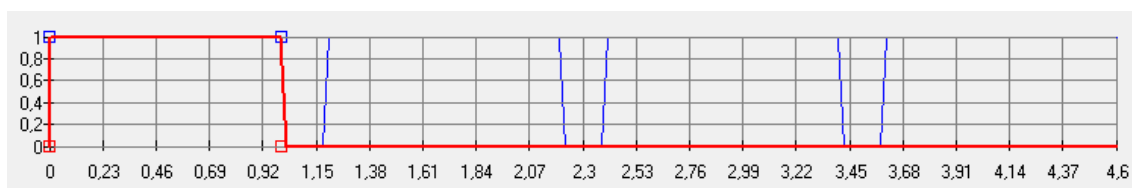
Obrázek 22.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné druh terapie

T-klasifikace

Vstupní jazyková proměnná T-klasifikace nabývá celkem čtyř možných hodnot popisující tumor: T_1, T_2, T_3 a T_4 (obr. č. 23 a č. 24). Opět je zde použita proměnná null pro případ, kdy nás T-klasifikace při určování výsledné dávky nezajímá.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	T_1	trapezoid	0		0	1		1	Y
2.	T_2	trapezoid	1,2		1,2	2,2		2,2	Y
3.	T_3	trapezoid	2,4		2,4	3,4		3,4	Y
4.	T_4	trapezoid	3,6		3,6	4,6		4,6	Y
5.	null	trapezoid	0		0	4,6		4,6	Y

Obrázek 23.: T-klasifikace



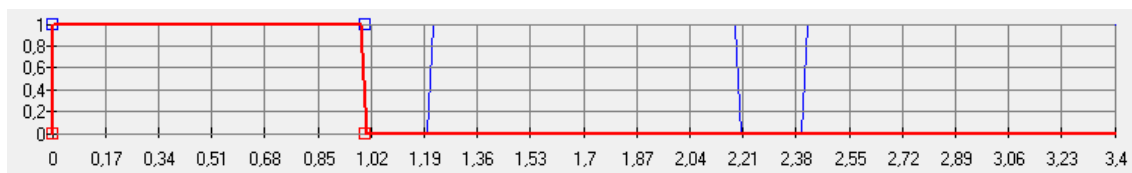
Obrázek 24.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné T-klasifikace

N-klasifikace

Jazyková proměnná N-klasifikace nabývá celkem čtyř možných hodnot popisující zasažení přilehlých uzlin rakovinou: N_0, N_1 a N_2 (obr. č. 25 a č. 26). I zde se vyskytuje proměnná null. Jedná se o obyčejné množiny.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	N_0	trapezoid	0		0	1		1	Y
2.	N_1	trapezoid	1,2		1,2	2,2		2,2	Y
3.	N_2	trapezoid	2,4		2,4	3,4		3,4	Y
4.	null	trapezoid	0		0	3,4		3,4	Y

Obrázek 25.: N-klasifikace



Obrázek 26.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné N-klasifikace

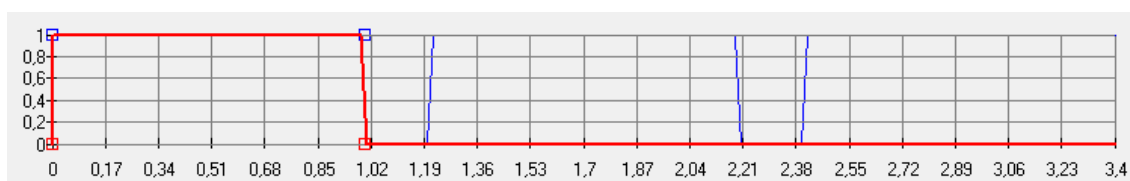
Místo ozáření

Poslední neméně důležitou vstupní jazykovou proměnnou je místo ozáření. Popisuje místo nebo oblast ozáření, může se jednat o malou pánev, anastomózu (lůžko

tumoru) nebo tumor (obr. č. 27 a č. 28). Hodnota null je zde použita proto, že v některých případech nezáleží na místě ozáření a přechází se rovnou k paliativní léčbě.

	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	MALA_PANEV	trapezoid	0		0	1		1	Y
2.	ANASTOMOZA	trapezoid	1,2		1,2	2,2		2,2	Y
3.	TUMOR	trapezoid	2,4		2,4	3,4		3,4	Y
4.	null	trapezoid	0		0	3,4		3,4	Y

Obrázek 27.: Místo ozáření



Obrázek 28.: Tvar jazykových hodnot vstupní proměnné místo ozáření

6.1.2. Výstupní jazyková proměnná expertního systému

Výstupní proměnná celého expertního systému se nazývá dávka a určuje velikost radioterapeutické dávky aplikované na pacienta (obr. č.29).

Name	Context
DAVKA	Simple [0; 5; 11.3]

Obrázek 29.: Výstupní proměnná dávka

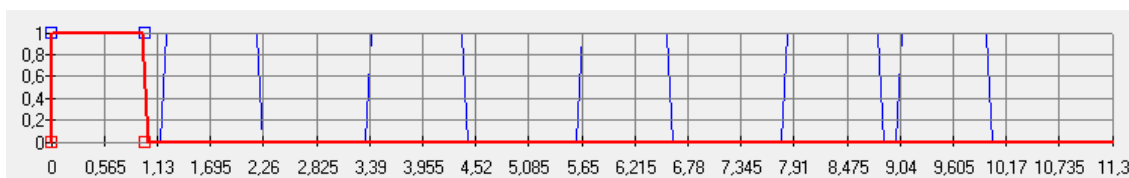
	Name	Type	Left Sup	Left Eq	Left Ker	Right Ker	Right Eq	Right Sup	Used?
1.	DAVKA_1	trapezoid	0		0	1		1	Y
2.	DAVKA_2	trapezoid	1,2		1,2	2,2		2,2	Y
3.	DAVKA_3	trapezoid	3,4		3,4	4,4		4,4	Y
4.	DAVKA_4	trapezoid	5,6		5,6	6,6		6,6	Y
5.	DAVKA_5	trapezoid	7,8		7,8	8,8		8,8	Y
6.	PALIATIVNI_LECBA	trapezoid	9		9	10		10	Y

Obrázek 30.: Hodnoty výstupní proměnné dávka

Výstupní proměnná určuje velikost aplikované radioterapeutické dávky nebo přístup k paliativní léčbě. Nabývá těchto hodnot: DAVKA_1, DAVKA_2, DAVKA_3,

DAVKA_4, DAVKA_5 a PALIATIVNI_LECBA (obr. č. 30 a č. 31). Jedná se opět o obyčejné množiny.

Výstup DAVKA_1 označuje hodnotu 50,4 Gy, DAVKA_2 hodnotu 45 Gy, DAVKA_3 hodnotu 16 Gy, DAVKA_4 hodnotu 9 Gy a DAVKA_5 hodnotu 5,4 Gy.

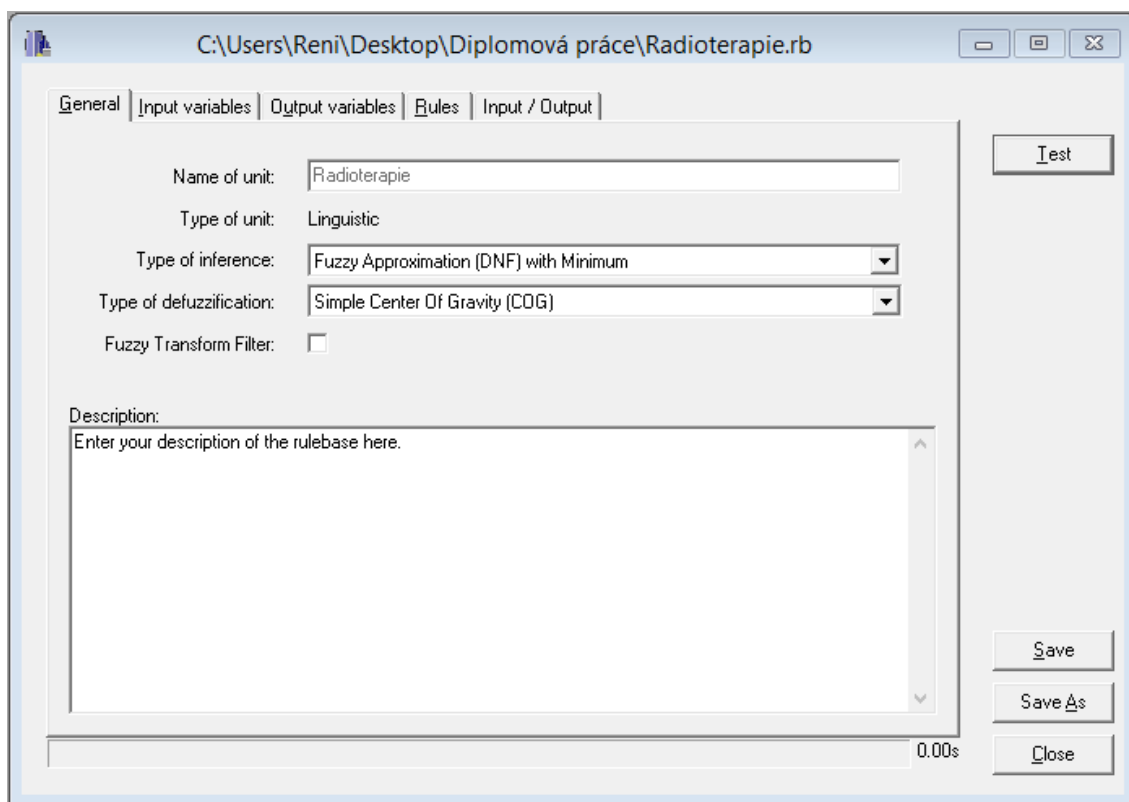


Obrázek 31.: Tvar jazykových hodnot výstupní proměnné dávka

6.1.1. Implementace v programové prostředí LFLC

Pro návrh báze znalostí bylo využito vývojové prostředí LFLC 2000 (Linguistic Fuzzy Logic Controller). Hlavní okno prezentuje obrázek č. 32. Jedná se o speciální software pro vytvoření expertního systému, který umožňuje vyvození závěru na základě ne zcela přesného (fuzzy) popisu dané situace pomocí jazykově formulovaných fuzzy IF-THEN pravidel. Výstupem je číslo charakterizující ostrou množinu výsledné radioterapeutické dávky.

V programovém prostředí LFLC byla vytvořena báze pravidel s názvem Radioterapie.rb. Typ modelu je jazykový, typ inference Fuzzy Aproximace s Minimem (DNF) a typ defuzzifikace Jednoduchá metoda těžiště (COG).



Obrázek 32.: Prostředí LFLC

6.1.2. Pravidla báze znalostí expertního systému

Báze znalostí pro určení správné výsledné radioterapeutické dávky obsahuje jazykový model s celkem 61 pravidly. Tato pravidla jsou zapsána pomocí IF-THEN interpretace.

Obecný tvar zapsaných pravidel je následující:

$IF [KI \text{ is } A(KI) \text{ and } MOC_MECHYR \text{ is } A(MOC_MECHYR) \text{ and } REPRO_ORGANY \text{ is } A(REPRO_ORGANY) \text{ and } STREVNI_SLIZNICE \text{ is } A(STREVNI_SLIZNICE) \text{ and } DRUH_RADIOTERAPIE \text{ is } A(DRUH_RADIOTERAPIE) \text{ and } T_KLASIFIKACE \text{ is } A(T_KLASIFIKACE) \text{ and } MISTO_OZARENI \text{ is } A(MISTO_OZARENI)] THEN [DAVKA \text{ is } B(DAVKA)]$

Kompletní báze znalostí se všemi 61 pravidly shrnuje obr. č. 33.

	KI	MOC_MECHYR	REPRO_ORGANY	STREVNÍ_SLIZNICE	DRUH_RADIOTERAPIE	T_KLASIF	N_KLASIF	MISTO_OZARE	DAVKA
1.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_1	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
2.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_1	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
3.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_2	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
4.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_2	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
5.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_3	N_0	null	PALIATIVNI_LECBA
6.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_4	N_0	null	PALIATIVNI_LECBA
7.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_3	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
8.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_4	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
9.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_3	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
10.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_4	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
11.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_1	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
12.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_1	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
13.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_2	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
14.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_2	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
15.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_3	N_0	null	PALIATIVNI_LECBA
16.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_4	N_0	null	PALIATIVNI_LECBA
17.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_3	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
18.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_4	N_1	null	PALIATIVNI_LECBA
19.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_3	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
20.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	POOPERACNI	T_4	N_2	null	PALIATIVNI_LECBA
21.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_1	N_1	TUMOR	DAVKA_3
22.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_1	N_2	TUMOR	DAVKA_3
23.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_2	N_1	TUMOR	DAVKA_3
24.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_2	N_2	TUMOR	DAVKA_3
25.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_1	N_1	MALA_PANEV	DAVKA_1
26.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_1	N_2	MALA_PANEV	DAVKA_1
27.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_2	N_1	MALA_PANEV	DAVKA_1
28.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	RADIKALNI	T_2	N_2	MALA_PANEV	DAVKA_1
29.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_1	MALA_PANEV	DAVKA_2
30.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_1	MALA_PANEV	PALIATIVNI_LECBA
31.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_2	MALA_PANEV	DAVKA_2
32.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_2	MALA_PANEV	PALIATIVNI_LECBA
33.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_2	TUMOR	DAVKA_3
34.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_2	TUMOR	PALIATIVNI_LECBA
35.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_1	TUMOR	DAVKA_3
36.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_NESCHOPNY	null	null	null	RADIKALNI	T_4	N_1	TUMOR	PALIATIVNI_LECBA
37.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	RADIKALNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_2
38.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	RADIKALNI	null	null	TUMOR	DAVKA_3
39.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_2
40.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_3	N_0	MALA_PANEV	DAVKA_2
41.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_4	N_0	MALA_PANEV	DAVKA_2
42.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_3	N_1	MALA_PANEV	DAVKA_2
43.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_3	N_2	MALA_PANEV	DAVKA_2
44.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_4	N_1	MALA_PANEV	DAVKA_2
45.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	null	null	null	PREDOPERACNI	T_4	N_2	MALA_PANEV	DAVKA_2
46.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
47.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
48.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
49.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
50.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
51.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
52.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
53.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	MALA_PANEV	DAVKA_1
54.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_4
55.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5
56.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5
57.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5
58.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_MALA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5
59.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_MALA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_VELKA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5
60.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5
61.	<input checked="" type="checkbox"/> KI_SCHOPNY	MOC_VZDALENOST_VELKA	REPRO_ORGANY_VZDALENOST_VELKA	STREVNÍ_SLIZNICE_VZDALENOST_MALA	POOPERACNI	null	null	ANASTOMOZA	DAVKA_5

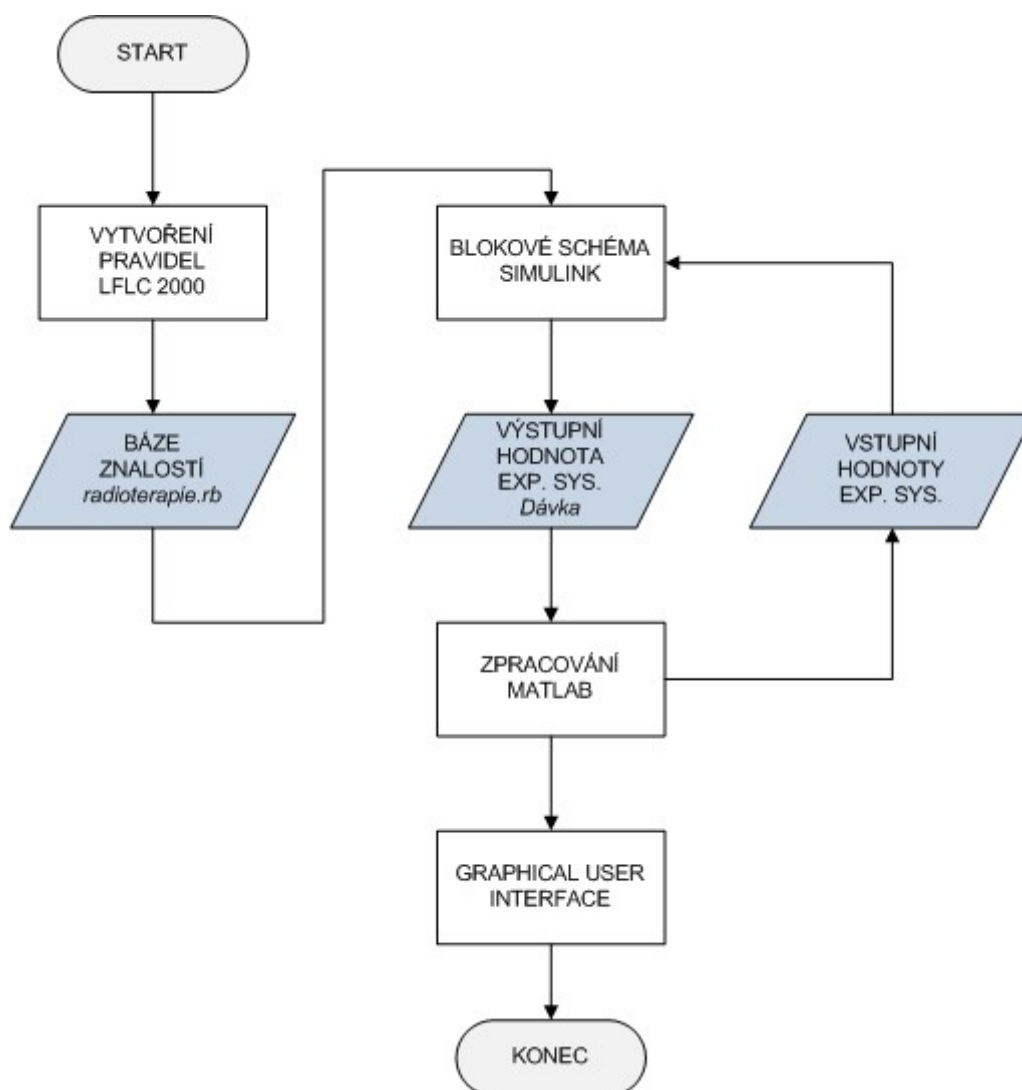
Obrázek 33.: Pravidla jazykového modelu expertního systému

6.1.3. Interaktivní systém v prostředí MATLAB-Simulink

Následující algoritmus (obr. č. 34) popisuje propojení a komunikaci programového prostředí LFLC 200 s MATLABem, a to za použití Simulinku a GUI (Graphical User Interface).

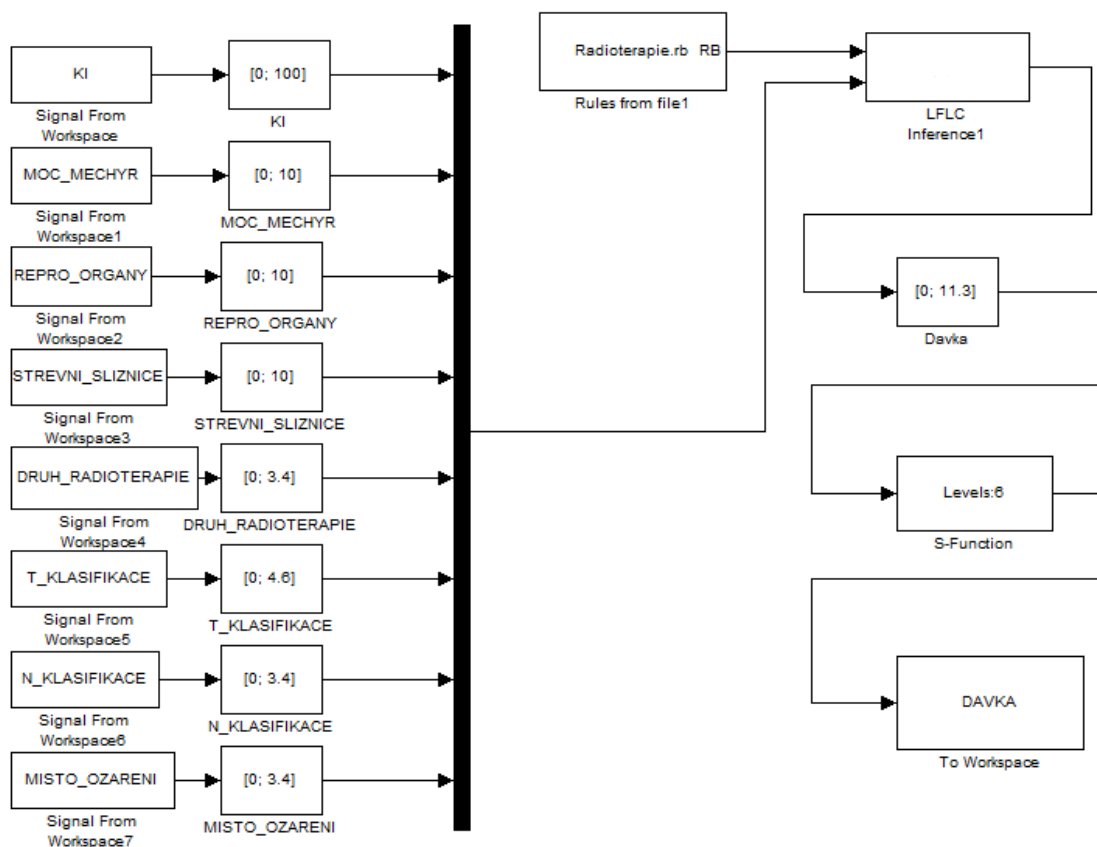
Nejdříve jsme vytvořili pravidla báze znalostí expertního systému v prostředí LFLC 2000. Následně jsme tato pravidla implementovali do Simulinku a pomocí dostupných knihoven LFLClibrary.mdl a fgm_library.mdl, které jsou pro propojení a správnou funkčnost nezbytné, jsme výstupní jazykovou proměnnou označující velikost dávky exportovali do MATLABu. Zde je výstup pomocí GUI uživateli jasně zobrazen.

Blokové schéma Simulinku demonstruje obr. č. 35.

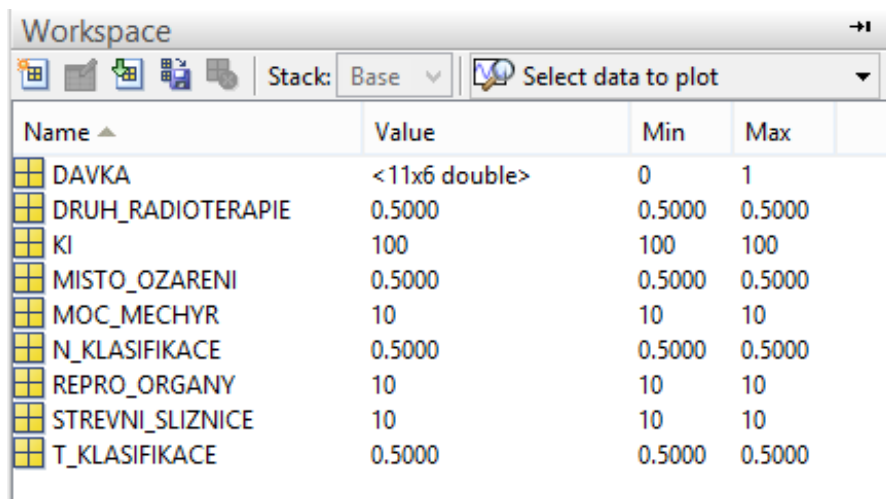


Obrázek 34.: Algoritmus komunikace LFLC 2000 a Matlab Simulink, GUI

Všechny vstupní hodnoty KI, MOC_MECHYR, REPRO_ORGANY, STREVNI_SLIZNICE, DRUH_RADIOTERAPIE, T_KLASIFIKACE, N_KLASIFIKACE a MISTO_OZARENI vstupují společně sází pravidel Radioterapie.rb do Simulinku a jsou načteny z Workspace v MATLABu a vyvedeny společně sází pravidel Radioterapie.rb na LFLC Inference. Po defuzzifikaci se výstup DAVKA opět zobrazí ve Workspace (obr. č. 36).



Obrázek 35.: Schéma propojení bloků v Simulinku



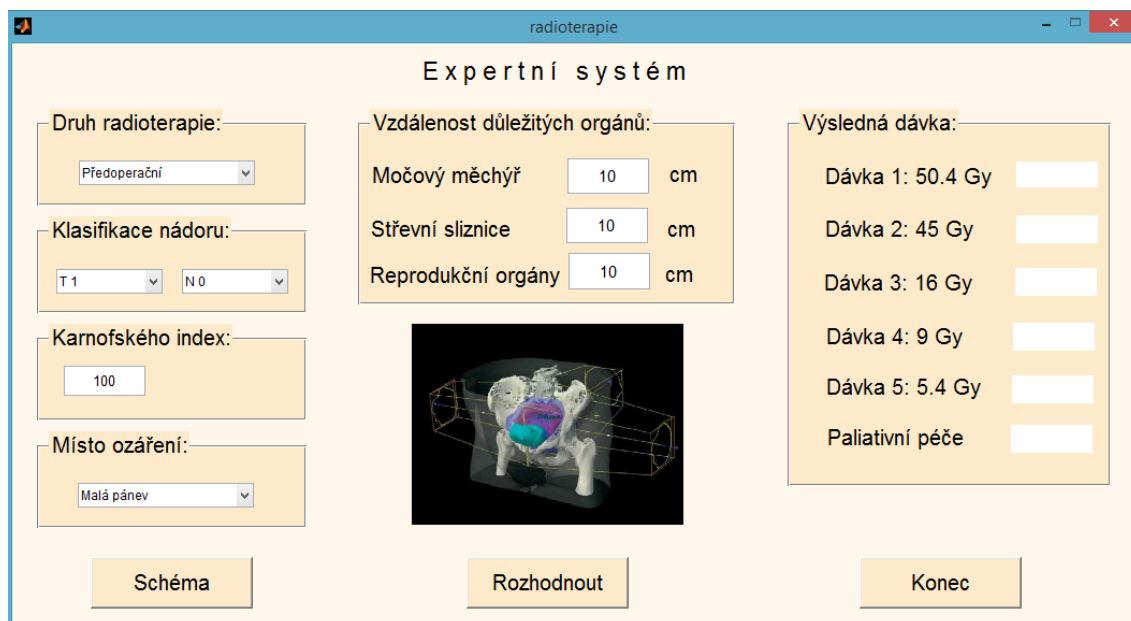
The screenshot shows the MATLAB Workspace window with a toolbar at the top containing icons for workspace, command window, and other tools. Below the toolbar is a 'Stack' dropdown menu set to 'Base' and a 'Select data to plot' button. The main area is a table with four columns: 'Name', 'Value', 'Min', and 'Max'.

Name	Value	Min	Max
DAVKA	<11x6 double>	0	1
DRUH_RADIOTERAPIE	0.5000	0.5000	0.5000
KI	100	100	100
MISTO_OZARENI	0.5000	0.5000	0.5000
MOC_MECHYR	10	10	10
N_KLASIFIKACE	0.5000	0.5000	0.5000
REPRO_ORGANY	10	10	10
STREVNI_SLIZNICE	10	10	10
T_KLASIFIKACE	0.5000	0.5000	0.5000

Obrázek 36.: Vstupní a výstupní proměnné ve Workspace

V MATLABu bylo vytvořeno GUI (Graphical User Interface – obr. č. 37), které již pracuje s proměnnými z workspace.

Je navrženo tak, aby uživatele vedl jasnými kroky k doporučení výsledné dávky. Aby tento systém fungoval správně, je třeba se řídit přesně danými postupy uvedenými v blokovém schématu (tlačítko Schéma, více na obr. č. 39). Například nedává smysl, aby se u předoperační radioterapie ozařovalo lůžko tumoru či jizva, jelikož se jedná o radioterapii před operací – tudíž se zde nádor ještě nachází.



The screenshot shows the 'radioterapie' GUI window. It has a title bar with standard window controls. The main area is titled 'Expertní systém' and contains several input sections on the left and a results section on the right. In the center, there is a 3D anatomical model of a human pelvis with a tumor highlighted in blue. At the bottom, there are three buttons: 'Schéma', 'Rozhodnout', and 'Konec'.

Expertní systém

Druh radioterapie: Předoperační

Klasifikace nádoru: T 1 N 0

Karnofského index: 100

Místo ozáření: Malá pánev

Vzdálenost důležitých orgánů:

- Močový měchýř: 10 cm
- Střevní sliznice: 10 cm
- Reprodukční orgány: 10 cm

Výsledná dávka:

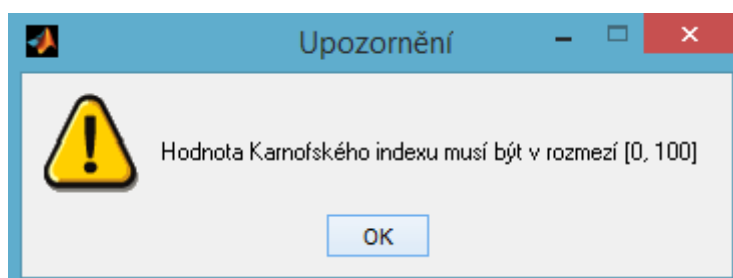
- Dávka 1: 50.4 Gy
- Dávka 2: 45 Gy
- Dávka 3: 16 Gy
- Dávka 4: 9 Gy
- Dávka 5: 5.4 Gy
- Paliativní péče

Buttons: Schéma, Rozhodnout, Konec

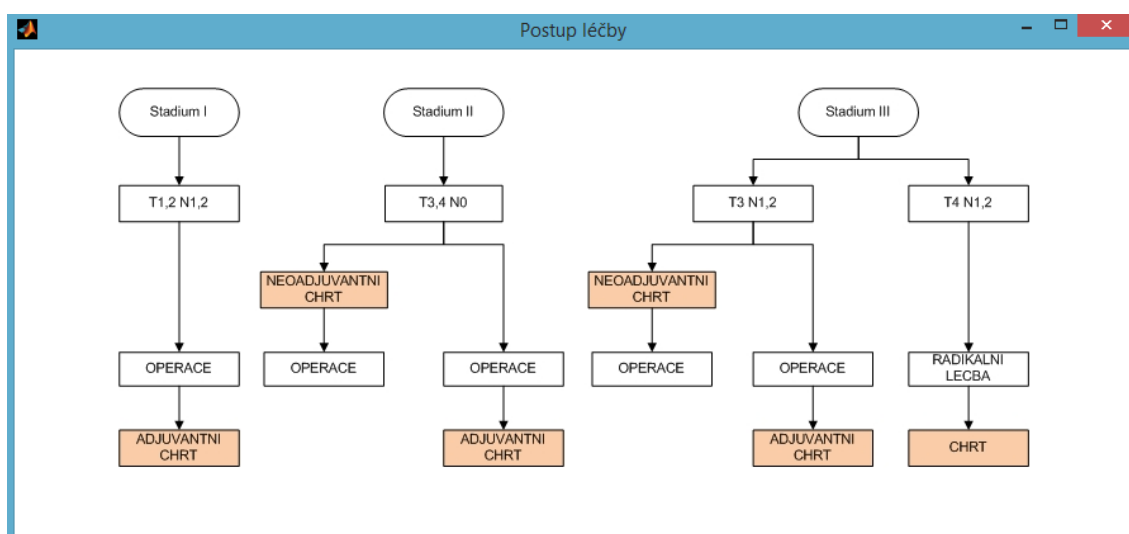
Obrázek 37.: Uživatelské rozhraní

V levé části programu zadává uživatel vstupní proměnné: druh radioterapie, T-klasifikace, N-klasifikace, Karnofského index, místo ozáření a vzdálenosti důležitých orgánů. U Karnofského indexu a vzdáleností je třeba zadat číslo v centimetrech

s přesností na desetinu čísla. Pokud dojde k zadání nesmyslného čísla nebo čísla mimo rozsah, objeví se chybové hlášení (obr. č. 38).



Obrázek 38.: Chybové hlášení



Obrázek 39.: Schéma lékařského postupu

7. Ověření funkce navrženého systému

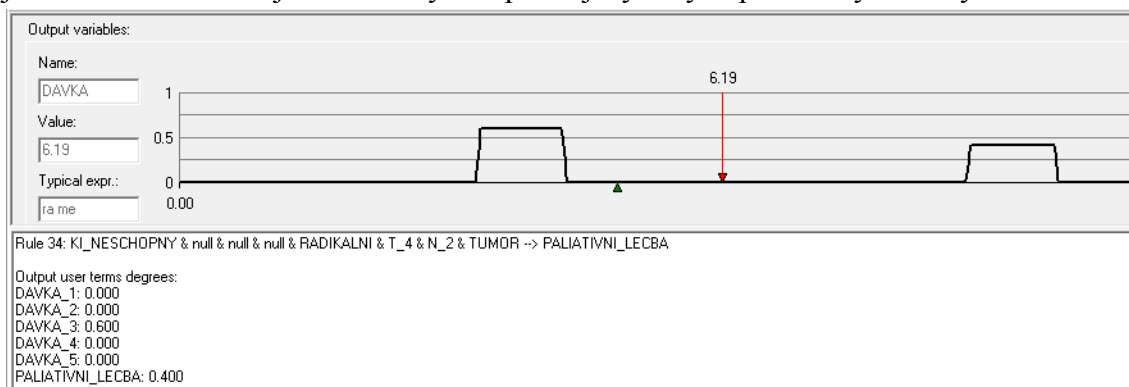
7.1. Simulační ověření funkce jazykového modelu

Pro ověření funkčnosti navrženého expertního systému jsme zvolili simulované hodnoty vstupních proměnných třech pacientů (tab. 3). Simulace byla provedena v programovém prostředí LFLC 2000.

Tabulka 3: Diagnóza simulovaných pacientů

	1. pacient	2. pacient	3. pacient
KI	76	75	75
T-klasifikace	T 4	T 1	T 3
N-klasifikace	N 2	N 2	N 2
Druh radioterapie	radikální	předoperační	pooperační
Místo ozáření	tumor	malá pánev	anastomóza
Vzdálenost močového měchýře	null	null	6,6
Vzdálenost reprodukčních orgánů	null	null	10
Vzdálenost střevní sliznice	null	null	10

U prvního pacienta jsme simulovali diagnózu uvedenou v tabulce č. 3, kterou jsme následně zadali jako hodnoty vstupních jazykových proměnných do systému.



Obrázek 40.: Výstupní hodnota expertního systému simulovaného prvního pacienta

Míra příslušnosti k jazykové hodnotě (obr. č. 40) byla následující:

dávka 3: 0.6

paliativní péče: 0.4

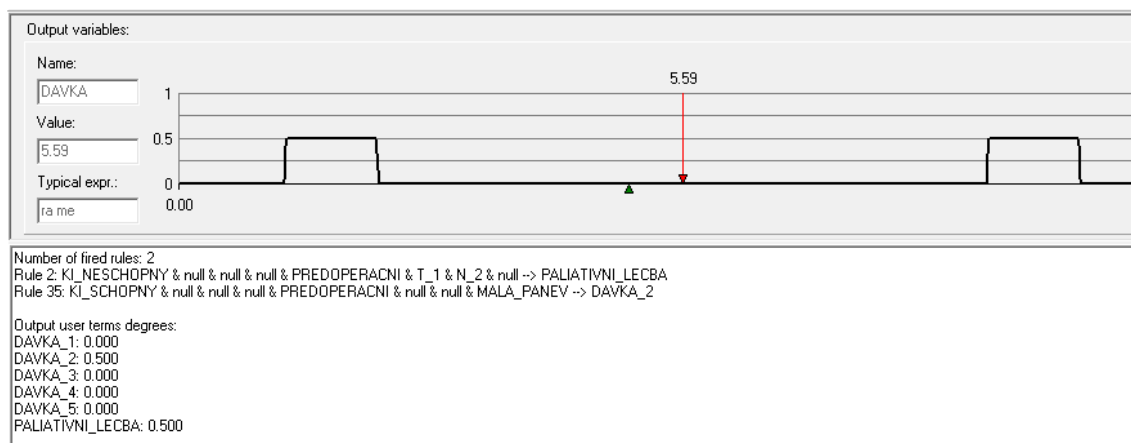
Dávka 3 znamená 16 Gy. Uživatel obdrží návrh doporučení, v němž je tato dávka dominantní a může ji realizovat, případně podle svého názoru upravit..

Po zadání vstupních jazykových hodnot druhého pacienta, jehož diagnózu jsme simulovali, jsme obdrželi dvě míry příslušnosti:

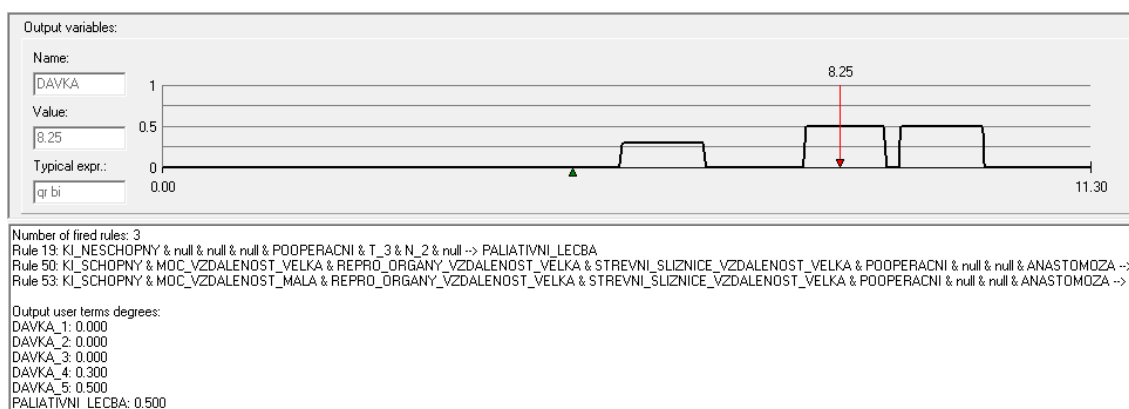
dávka 2: 0.5

paliativní léčba: 0.5

Zde se rozhoduje mezi dvěma možnostmi: simulovaný pacient obdrží radioterapeutickou dávku 45 Gy, nebo se přistoupí k léčbě paliativní (obr. č. 41).



Obrázek 41.: Výstupní hodnota expertního systému simulovaného druhého pacienta



Obrázek 42.: Výstupní hodnota expertního systému simulovaného třetího pacienta

Rovněž u třetího simulovaného pacienta jsme zadali vstupní jazykové hodnoty do systému (obr. č. 41) a dostali jsme následující míry příslušnosti:

dávka 4: 0.3

dávka 5: 0.5

paliativní léčba: 0.5

Systém nyní doporučuje dávku 5 případně léčbu paliativní.

7.2. Experimentální ověření funkce systému

Experimentální ověření funkce expertního systému proběhlo na reálných patientských záznamech. Celkem se testovalo deset pacientů, jejichž přesné znění diagnózy a léčebného postupu bylo poskytnuto expertem – lékařem.

Pro ukázkou jsme vybrali náhodné diagnózy tří pacientů (tab. 4).

Tabulka 4: Diagnóza pacientů

	1. pacient	2. pacient	3. pacient
KI	90	75	80
T-klasifikace	T 3	T 2	T 4
N-klasifikace	N 0	N 1	N 1
Druh radioterapie	pooperační	předoperační	pooperační
Místo ozáření	anastomóza	malá pánev	anastomóza
Vzdálenost močového měchýře	10 cm	null	6,9 cm
Vzdálenost reprodukčních orgánů	10 cm	null	10 cm
Vzdálenost střevní sliznice	10 cm	null	10 cm

První pacient byl přijat na onkologickou kliniku s diagnózou uvedenou v tabulce č. 4: *Pacient indikovaný k adjuvantní radioterapii, Karnofského index 90 %, TNM klasifikace: T3 N0, místo ozáření: anastomóza*

Terapeutický plán v přijímací zprávě byl následující:
adjuvantní radioterapie 9 Gy.

Pacient skutečně obdržel dávku 4: 9 Gy, náš expertní systém vyhodnotil radioterapeutickou dávku správně (obr. č. 43).

Výsledná dávka:

Dávka 1: 50.4 Gy	<input type="text" value="0"/>
Dávka 2: 45 Gy	<input type="text" value="0"/>
Dávka 3: 16 Gy	<input type="text" value="0"/>
Dávka 4: 9 Gy	<input type="text" value="1"/>
Dávka 5: 5.4 Gy	<input type="text" value="0"/>
Paliativní péče	<input type="text" value="0"/>

Obrázek 43.: Výstupní hodnota expertního systému prvního pacienta

Druhý zvolený pacient byl přijat na onkologickou kliniku s následující diagnózou: *Pacient indikovaný k neoadjuvantní radioterapii, Karnofského index 75 %, TNM klasifikace: T2 N1, místo ozáření: malá pánev*

Terapeutický plán v přijímací zprávě byl následující:
adjuvantní radioterapie 45 Gy.

Přestože náš expertní systém vyhodnotil tuto diagnózu pomocí dvou možných terapií (obr. č. 43):

dávka 2: 0.5

paliativní péče: 0.5

pacient byl indikován k radioterapii a obdržel dávku 2: 45 Gy.

Výsledná dávka:	
Dávka 1: 50.4 Gy	0
Dávka 2: 45 Gy	0.5
Dávka 3: 16 Gy	0
Dávka 4: 9 Gy	0
Dávka 5: 5.4 Gy	0
Paliativní péče	0.5

Obrázek 44.: Výstupní hodnota expertního systému druhého pacienta

Poslední pacient při přijetí na onkologickou kliniku měl následující diagnózou: *Pacient indikovaný k adjuvantní radioterapii, Karnofského index 80 %, TNM klasifikace: T4 N1, místo ozáření: anastomóza, vzdálenost močového měchýře 6,9 cm.*

Terapeutický plán v přijímací zprávě byl následující:
adjuvantní radioterapie 5,4 Gy.

Expertní systém vyhodnotil tuto diagnózu opět pomocí dvou možných terapií (obr. č. 44):

dávka 4: 0.45

dávka 5: 0.55

a pacient obdržel dávku 5: 5,4 Gy.

Výsledná dávka:	
Dávka 1: 50.4 Gy	0
Dávka 2: 45 Gy	0
Dávka 3: 16 Gy	0
Dávka 4: 9 Gy	0.45
Dávka 5: 5.4 Gy	0.55
Paliativní péče	0

Obrázek 45.: Výstupní hodnota expertního systému třetího pacienta

Ve všech případech, kdy jsme otestovali deset pacientů, fungoval expertní systém správně a zvolená terapie odpovídala terapii navržené.

8. Závěr

Téma diplomové práce je zaměřeno na návrh fuzzy-logického expertního systému pro podporu rozhodování v radioterapii, který využívá znalostí převzatých od odborníka a při určení radioterapeutické dávky pro léčbu rakoviny rekta poskytne stejně kvalitní rozhodnutí.

Diplomová práce je členěna do několika kapitol zabývajících se odbornou tematikou, potřebnou k pochopení dané problematiky a následně popisem funkčnosti fuzzy-logického expertního systému, jeho návrhu, implementace a testování.

První část se tedy věnuje teoretickému popisu rakoviny recta – ve stručnosti se soustředí na anatomii, uvádí současný přehled možností terapie a popis faktorů, které určují výslednou radioterapeutickou dávku.

Druhá část práce je zaměřena na popis systémů pro počítačovou podporu rozhodování a teoretické principy použitých fuzzy množinových a fuzzy logických metod.

Třetí část se zabývá návrhem expertního systému editovaného ve vývojovém programovém prostředí LFLC 2000 (Linguistic Fuzzy Logic Controller). Jazykový model báze znalostí systému je tvořen osmi vstupními jazykovými proměnnými a jednou výstupní proměnnou. Model je určen k rozhodování o velikosti výsledné radioterapeutické dávky. V práci je rovněž podrobně popsána možnost propojení báze pravidel vytvořených v LFLC 2000 s MATLABem - Simulinkem. Je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje uživateli lepší přehlednost a snadnější přístup k takovému systému.

Poslední část práce dokumentuje ověření funkce jazykového modelu počítačovými simulacemi, které přispěly k jeho odladění. Experimentální ověření funkce systému prokázalo jeho správnost – ve všech 3 experimentálních případech se dávka modelem doporučená rovnala dávce skutečně aplikované.

Jazykový model řešené problematiky je modelem otevřeným, připraveným pro další vývoj. Ten se může ubírat cestou dalšího rozvoje jeho struktury, která může být rozšířena o další výstupní proměnné a příslušná pravidla.

Součástí diplomové práce je rovněž CD s přílohami a daným navrženým expertním systémem. Přílohy jsou rovněž knihovny vytvořené v MATLABu Simulinku, které jsou nezbytné pro spuštění a správnou funkčnost celého expertního systému.

Seznam použité literatury

- [1] *Databáze příznaků a indikací častých nemocí* [online]. [citováno 5.3.2015] < <http://www.symptomy.cz/anatomie/travici-soustava/dolni-travici-tract/konecnik>>
- [2] ŠTĚPÁN, R. [online]. [citováno 5.3.2015] < <http://www.irakovina.cz/rakovina-konecniku/>>
- [3] *U lékaře* [online]. [citováno 10.3.2015] < <http://www.ulekare.cz/clanek/rakovina-konecniku-a-tracniku-kolorektalni-karcinom-2796>>
- [4] *Systém pro vizualizaci onkologických dat* [online]. [citováno 5.3.2015] < <http://www.svod.cz/prehled.php#>>
- [5] JABLONSKÁ, M. *Kolorektální karcinom: časná diagnóza a prevence*. 1. vyd. Praha: Grada, 2000, 455 s. ISBN 80-7169-777-x.
- [6] VYSLOUŽIL, K. *Komplexní léčba nádorů rekta*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. 196 s. ISBN 80-247-0628-8.
- [7] VYZULA, R., ŽALOUDÍK J. a kol. *Rakovina tlustého střeva a konečníku: vybrané kapitoly*. 1. vyd. Praha: Maxdorf, 2007. 287 s. ISBN 978-80-7345-140-0.
- [8] ČEŠKA, R. a kol. *Lékařské repetitorium* [online]. [citováno 2.2.2015] < http://www.medicabaze.cz/index.php?sec=term_detail&categId=19&cname=Onkologie&pgn=30&termId=3485&tname=Principy+proton%C3%A1dorov%C3%A9+1%C3%A9+4%8Dby&h=empty#jump >
- [9] POLREICHOVÁ, K. *Poradiační reakce u karcinomů rekta (srovnání samostatné RT a CHRT)*. Olomouc, 2010. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [10] *Fakultní nemocnice Ostrava* [online]. [citováno 10.3.2015] < <http://www.fno.cz/klinika-onkologicka/fotogalerie> >
- [11] MAŘÍK, V. *Umělá inteligence (2)*, ACADEMIA Praha, 1997, ISBN 80-200-0504-8
- [12] POKORNÝ, M. a Z. Křišová. *Znalostní systémy*. Olomouc: MVŠO, 2011
- [13] POKORNÝ, M. *Expertní systémy*. Ostravská univerzita v Ostravě, PřF, 2012
- [14] POKORNÝ, M. *Umělá inteligence v modelování a řízení*. BEN Praha. 1996. ISBN 80-901984-4-9
- [15] NOVÁK, V. *Základy fuzzy modelování*. BEN Praha, 2000, ISBN 80-7300-009-1

- [16] NOVÁK, V. *Fuzzy množiny a jejich aplikace*. SNTL Praha. 1990. ISBN 80-03-00325-3.
- [17] *LFLC 2000, Linguistic Fuzzy Logic Controller*. Ústav pro výzkum a aplikace fuzzy modelování. Ostravská univerzita v Ostravě, 2003.
- [18] SKÁCELÍKOVÁ, E. *Protokol léčby karcinomu rekta*. Klinika onkologická FNO, 2014

Seznam příloh

Příloha na CD	Znalostní systém: uživatelská aplikace MATLAB, pravidla vytvořená v LFLC 2000, Simulink knihovny
---------------	--